



Complexité et Dynamique de l'endommagement et de la rupture, Mécanique, sismicité et invariance d'échelle des objets géologiques

David Amitrano

► To cite this version:

David Amitrano. Complexité et Dynamique de l'endommagement et de la rupture, Mécanique, sismicité et invariance d'échelle des objets géologiques. Sciences de la Terre. Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, 2005. tel-00173641

HAL Id: tel-00173641

<https://theses.hal.science/tel-00173641>

Submitted on 20 Sep 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Institut National Polytechnique de Lorraine
Laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages, LAEGO**

**Mémoire pour l'obtention de l'
Habilitation à Diriger les Recherches**

***Complexité et Dynamique et de l'endommagement et de la rupture,
Mécanique, sismicité et invariance d'échelle des objets géologiques***

***Présenté par
Davide AMITRANO***

***Date de soutenance prévue :
4 Novembre 2005***

Composition du Jury :

Rapporteurs :

Jean-Pierre Gratier,	Physicien d'observatoire,	Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble
Yves Gueguen,	Professeur,	Ecole Normale Supérieure de Paris
Jean-Pierre Vilotte,	Physicien d'observatoire,	Institut de Physique du Globe de Paris

Examineurs,

Jack Pierre Piguet,	Professeur,	Ecole Nationale Supérieure des Mines de Nancy
Claudio Scavia,	Professeur,	Politecnico di Torino
Jean Schmittbuhl,	Directeur de Recherche,	Institut de Physique du Globe de Strasbourg

Plan du mémoire

Cadre général de la recherche.....	5
1. Sismicité des roches et comportement mécanique à différentes échelles	9
1.1. Sismicité à l'échelle d'un échantillon de laboratoire et d'un pilier de mine.....	9
1.2. Sismicité des versants instables.....	10
1.2.1. Ecoute sismique de deux versants instables de grande ampleur : La Clapière (Alpes Maritimes) et Les Ruines de Séchilienne (Isère)	12
1.2.2. Comportement précurseur de l'activité sismique d'une falaise avant un effondrement rocheux.....	15
1.3. Modélisation numérique de l'endommagement et de la sismicité associée.....	17
1.4. Simulation numérique du fluage des roches par endommagement dépendant du temps Erreur ! Signet non défini.	
2. Structures, dynamique et invariance d'échelles dans la déformation des roches	24
2.1. Micromécanismes de déformation des roches et structure de l'endommagement...	24
2.2. Invariance et changement d'échelle, dans la déformation des objets géophysiques.	26
3. Rôle des fluides dans la déformation des massifs rocheux	27
3.1. Sismicité induite, couplage hydromécanique, interaction fluide/roche dans un massif rocheux fracturé.....	27
3.1.1. Sismicité induite et couplage hydromécanique sur le site de Coaraze (Alpes Maritimes)	27
3.1.2. Sismicité induite par l'envoie de piliers de mine	29
3.2. Caractérisation de l'hétérogénéité d'un écoulement fluide dans une fracture rocheuse	30
3.3. Comportement hydromécanique et endommagement des roches partiellement saturées.....	32
3.4. Projet de développement sur le thème Interaction et couplage fluide/roche.....	36
4. Synthèse et perspectives.....	39
5. Références Bibliographiques.....	41
Annexe 1 : Liste des Publications.....	45
Annexe 2 : Résumé des activités et responsabilités de recherche	51
Annexe 3 : Activités d'enseignement	55
Annexe 4 : Curriculum vitae	58
Annexe 5 : Copie des publications dans des revues internationales et nationales.....	59

Cadre général de la recherche

Le comportement mécanique des roches, pour des échelles allant de celle de l'échantillon de laboratoire à celle de la croûte terrestre, est souvent décrit comme complexe, terme couramment employé comme synonyme de compliqué. Cette complexité tient d'une part à la diversité des comportements mécaniques observés pour les roches, (élastique/plastique, fragile/ductile, endommageant, visqueux,...) et d'autre part aux nombreux paramètres influençant le comportement mécanique. Il peut s'agir de paramètres liés à la composition du matériau rocheux (minéralogie, microstructure, densité, distribution de fissuration), ou aux conditions de chargement (pression, température, vitesse de déformation), ou encore aux interactions hydromécanique et physico chimiques avec les fluides occupant tout ou partie de l'espace poreux (eau, gaz, pétrole). Ainsi une même roche pourra montrer un comportement fragile ou ductile selon les conditions de chargement (vitesse de déformation, confinement, température, saturation en eau). La complexité tient également aux processus de déformations à petite échelle (propagation de fissures, plasticité par saut de dislocation, par glissement sur des discontinuités) qui interagissent entre eux et dont il est difficile d'estimer l'effet collectif sur le comportement mécanique macroscopique.

La complexité du comportement mécanique apparaît également au sein même du processus de déformation. Lors de la sollicitation mécanique du matériau rocheux, la déformation globale comporte des déformations inélastiques localisées qui peuvent être quantifiées par le biais de l'onde élastique de déformation et de contrainte émise [Lockner, 1993]. On l'observe aussi bien à l'échelle crustale (sismicité), qu'à l'échelle des massifs rocheux (microsismicité) qu'à celle des échantillons de laboratoire (émission acoustique, EA). A ces différentes échelles, la sismicité montre à la fois une imprédictibilité de chaque événement pris individuellement (taille, lieu et temps d'occurrence) et une prédictibilité statistique (raccordement à des lois statistiques bien identifiées). En effet, on observe des distributions en loi puissance particulièrement robustes dans les trois domaines de la taille des événements sismiques [Gutenberg and Richter, 1954], de leur répartition spatiale [Hirata et al., 1987] et temporelle [Omori, 1894; Hirata, 1987]. Ces distributions indiquent une invariance d'échelle c'est à dire une absence de taille caractéristique et une corrélation entre différentes échelles. De même, l'observation de l'état d'endommagement de roches après déformation mécanique, telles que l'on peut les observer au voisinage des fractures, révèle des propriétés fractales (rugosité des surfaces de rupture, microstructure, ...) [Marone and Scholz, 1989; Sammis and Biegel, 1989; Schmittbuhl et al., 1993; Boullier et al., 2004b]. Ceci montre des invariances d'échelles et des corrélations spatiales à grande portée qui sont des indicateurs supplémentaires de la complexité des mécanismes de déformation et de rupture.

Pour mieux comprendre cette complexité, une voie consiste à intégrer l'ensemble des paramètres jugés pertinents dans le comportement élémentaire (propriétés mécaniques, processus micro-mécaniques, micro-structures) et à simuler le comportement mécanique ainsi obtenu. Cette approche se confronte à de nombreuses difficultés à la fois méthodologiques (estimations des paramètres, hiérarchisations des processus, description effective de la structure) et numériques (absence de méthode générale pour prendre en compte l'ensemble des processus).

Pour ma part, j'ai choisi une voie alternative qui consiste à considérer que la complexité observée résulte de mécanismes simples à petite échelle qui par interaction élastique font émerger des propriétés macroscopiques complexes [Burridge and Knopoff, 1967; Bak et al., 1988; Zapperi et al., 1997a; Zapperi et al., 1997b; Hergarten and Neugebauer, 1998]. De ce point de vue les objets géologiques sont appréhendés comme des systèmes complexes.

L'objectif principal de ma recherche est d'améliorer la compréhension des mécanismes de déformation des objets géologiques, en particulier les processus qui mènent à la rupture. Ce travail s'intéresse à des échelles très étendues (échantillon de laboratoire, massif rocheux, croûte terrestre). J'associe dans ma démarche l'analyse des structures d'endommagement et de fracturation, laquelle donne une vue statique, et la sismicité qui donne accès à la dynamique de ces processus. Cette recherche s'est d'abord portée principalement sur des essais de laboratoire et sur la sismicité à l'échelle de la croûte terrestre. Ce travail a été associé à la modélisation numérique de l'endommagement et de la rupture. Cette recherche s'est progressivement tournée vers les massifs rocheux (instabilités gravitaires : mines souterraines et glissements de terrain), et la prise en compte du rôle des fluides dans leur déformation, tout en valorisant l'apport de l'écoute sismique pour l'étude de ces objets.

La Figure 1 présente de manière synthétique comment ces différents aspects se coordonnent entre eux. L'écoute sismique permet l'observation de la dynamique de l'endommagement et de la fracturation, induits par la sollicitation mécanique. Elle peut être déclenchée par des variations de pression de fluide (sismicité induite). Les fluides influent sur la déformation, à la fois par le biais de modification de l'état de contrainte et par les modifications des propriétés du matériau roche. L'endommagement et la fracturation conditionnent les écoulements fluides par leur effet sur la perméabilité.

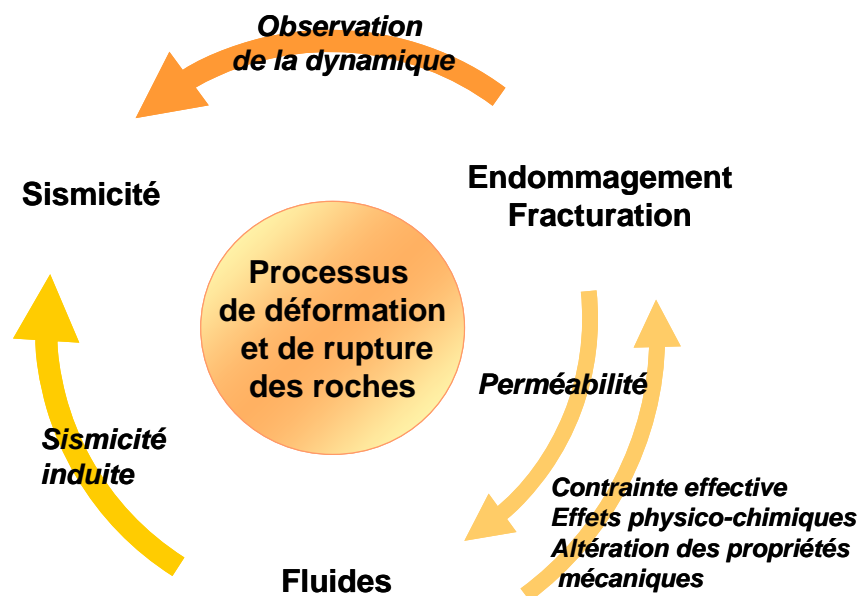


Figure 1 : Approche développée pour l'étude des processus de déformation et de rupture des roches, en particulier dans le cas des instabilités gravitaires. L'écoute sismique est utilisée comme outil d'observation de la dynamique de l'endommagement et de la fracturation et peut être induite par des variations de pression de fluides. Ceux-ci conditionnent l'état de contrainte (contrainte effective) et interviennent dans les propriétés mécaniques des roches par des effets physico-chimiques (ex. corrosion sous contrainte). L'endommagement et la fracturation conditionnent les écoulements fluides par leur effet sur la perméabilité.

Sur l'ensemble de ces aspects, je développe une approche multi-échelle dans laquelle je mets en œuvre la démarche suivante : *observation expérimentale, modélisation des données, simulation numérique*. L'existence d'invariances d'échelle permet d'envisager une transposition de ces résultats à différentes échelles. Cette transposition n'est pas systématiquement possible. Par exemple, les précurseurs de la rupture observés en laboratoire n'ont toujours pas montré leur pertinence à l'échelle des massifs rocheux ou de la croûte

terrestre. Il est donc nécessaire de rechercher les conditions dans lesquelles l'invariance d'échelle est vérifiée et les conditions limitantes.

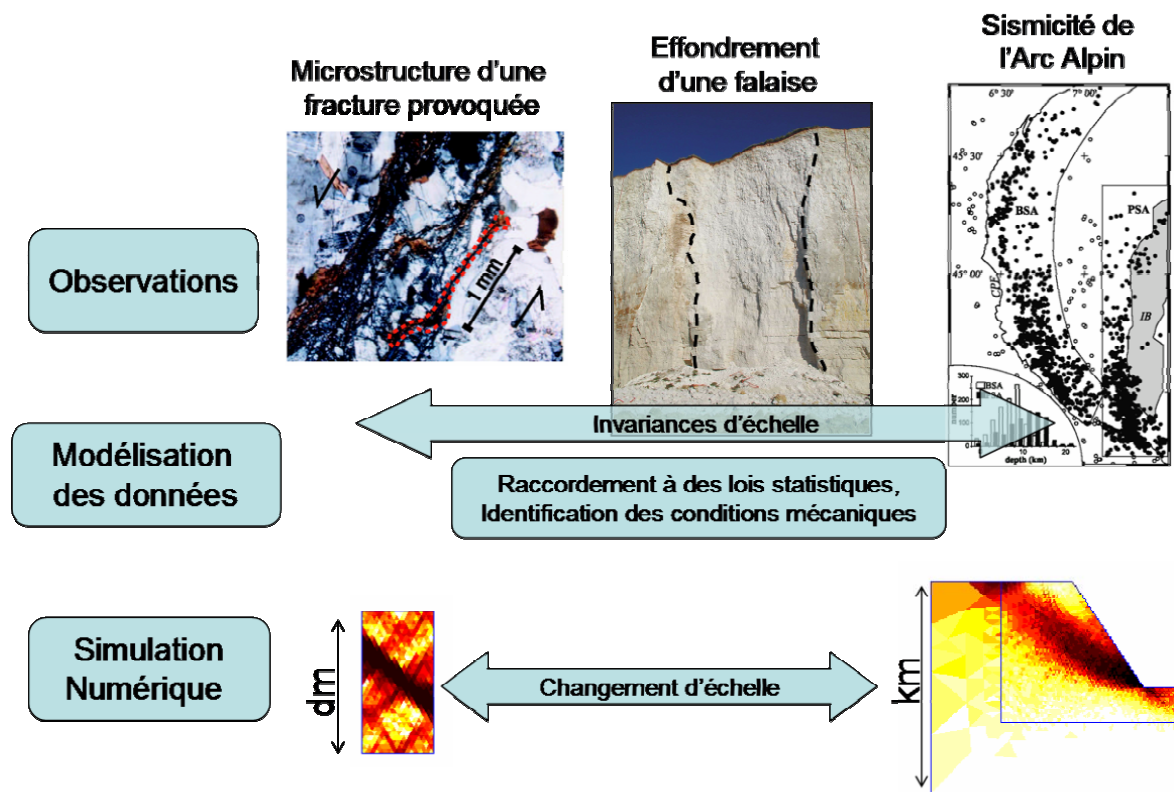


Figure 2 : Approche multi échelle de l'endommagement et de la rupture. Pour chaque échelle considérée, je développe une démarche associant l'observation expérimentale, la modélisation des données et la simulation numérique. Le raccordement des observations à des distributions statistiques en lois puissance permet d'identifier la présence d'invariances d'échelle et le rôle des conditions mécaniques. La simulation numérique permet de rechercher comment les propriétés émergentes à grande échelles résultent des interactions à petites échelles et de réaliser ainsi un changement d'échelle.

L'analyse de structures d'endommagement obtenues en laboratoire [Amitrano and Schmittbuhl, 2002] ou prélevées dans des failles tectoniques [Boullier et al., 2004b], ainsi que la comparaison entre la sismicité observée en laboratoire [Amitrano, 2003] ou dans la croûte terrestre [Sue et al., 2002] nous a permis de mettre en évidence des propriétés d'invariance d'échelle mais aussi leurs limitations (effet de taille finie ou de pré-structuration du matériau). Ceci permet d'identifier les facteurs favorisant ou limitant l'invariance d'échelle, qui rendent possible ou impossible la transposition des observations à différentes échelles.

J'ai développé également une approche de simulation numérique basée sur l'interaction élastique d'éléments au comportement simple. Selon cette approche, j'ai proposé un modèle numérique qui permet de simuler un comportement macroscopique varié (du ductile au fragile) à partir d'un comportement élémentaire simple [Amitrano et al., 1999; Amitrano, 2003]. Le recours à ce type de modèle a permis de montrer qu'un certain nombre d'observations relatives au comportement mécanique des roches peuvent être vues comme des propriétés émergentes d'un système complexe [Amitrano, 2004]. Une évolution de ce modèle a été réalisée récemment pour prendre en compte l'effet du temps sur l'endommagement et permettre ainsi de simuler le comportement en fluage des roches [Amitrano and Helmstetter, 2005].

Un autre volet de ma recherche consiste à caractériser l'évolution temporelle des propriétés statistiques dans le but d'identifier des comportements précurseurs. On s'appuie pour cela sur des travaux issus de la mécanique statistique - systèmes critiques [Zapperi *et al.*, 1997a; Guarino *et al.*, 1998] ou critiques auto-organisés [Bak *et al.*, 1988] – qui prévoient des comportements caractéristiques à l'approche de la rupture. Nous cherchons à identifier ces comportements pour les objets géologiques à travers les observables dont nous disposons (principalement la sismicité). Cette approche a donné des résultats intéressants dans le cas d'une falaise de craie [Amitrano *et al.*, 2005], où nous avons mis en évidence plusieurs comportements annonciateurs d'un effondrement. Le modèle de fluage que nous avons développé reproduit de type de comportement au cours de la phase tertiaire du fluage. Il nous permet de proposer que l'effondrement résulte de la phase ultime de fluage tertiaire.

Une deuxième partie de ma recherche, qui constitue une évolution thématique débutée depuis près de trois ans, consiste à intégrer plus explicitement le rôle des fluides dans le comportement mécanique des roches. Ce travail s'appuie sur deux approches complémentaires : l'étude de l'écoulement fluide dans les fractures rocheuses, et l'impact des fluides sur le comportement mécanique du matériau roche.

A partir d'observations in situ, sur le site de Coaraze dans les Alpes Maritimes, nous avons mis en évidence l'existence d'une sismicité haute fréquence induite par la mise en charge hydraulique du site. Nous avons élaborer un modèle numérique d'interaction fluide roche en 2D, qui permet d'expliquer cette sismicité par des instabilités dans l'ouverture des aires de contact dans les fractures rugueuses. Un passage en 3D de ce modèle est en cours pour permettre une simulation plus réaliste du couplage hydromécanique et le calcul d'un écoulement dans l'espace poreux de la fracture. Nous étudions également les propriétés statistiques de la structure de l'écoulement et ses relations avec le milieu poreux.

En complément de cette approche microscopique orientée vers les écoulements, j'envisage une approche macroscopique en considérant l'effet des fluides sur le comportement mécanique. Il s'agit du développement d'un modèle de comportement des roches à long terme, sur la base du modèle de fluage développé [Amitrano and Helmstetter, 2005]. L'effet des fluides sera intégré, d'une part, par la notion de contrainte effective avec prise en compte du terme de couplage hydromécanique [Biot, 1941], d'autre part, en considérant l'effet de l'hygrométrie sur la fissuration sous-critique (effets physico-chimique d'activation de la corrosion sous contrainte). Ce développement nécessite d'être adossé à une approche expérimentale en laboratoire, afin de déterminer les relations entre endommagement, perméabilité, coefficient de Biot (terme de couplage hydromécanique) et traçage hydrochimique. Ce dernier point permettra, en outre, d'interpréter physiquement les signaux hydro-chimiques observés sur les mouvements de versants.

Dans le texte qui suit, je présente les détails de mes différents axes de recherche. Je présente d'abord les résultats de mes deux principaux axes de recherche entre 1999 et 2005 : sismicité des roches à différentes échelles (section 1) et structure et dynamique de la déformation et de la rupture des objets géologiques (section 2). Je présente ensuite le travail plus récent réalisé sur l'effet des fluides sur les mécanismes de déformation des roches et les perspectives de développement sur ce thème (section 3).

1. Sismicité des roches et comportement mécanique à différentes échelles

Cette recherche s'articule autour du thème de la sismicité et du comportement mécanique des roches. L'objectif principal est de parvenir à interpréter mécaniquement la sismicité observée à différentes échelles (échantillon de laboratoire, massif rocheux, croûte terrestre), en particulier pour la recherche de précurseurs de la rupture. Cette approche vise également à prendre en compte la complexité croissante du comportement des roches et des massifs rocheux lorsque l'échelle d'observation augmente (du dm au km). Ce thème trouve ses applications dans plusieurs domaines : prévision des coups de terrain dans les mines, des effondrements miniers en surface, des éboulements, des glissements de terrain et des séismes.

1.1. Sismicité à l'échelle d'un échantillon de laboratoire et d'un pilier de mine

Collaborations : G. Senfaute (LAEGO-Ineris Nancy), F. Homand , D. Grgic (LAEGO-INPL Nancy)

1 thèse en cours : J. Wassermann.

Ref. : 1.5, 1.10, 3.5, 4.1, 6.11

Cette recherche est menée dans le cadre du Groupement de Recherche sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains (GISOS), en collaboration avec l'INERIS. Il s'agit d'étudier les processus d'endommagement des roches en recourant aux méthodes d'écoute sismique à l'échelle de l'éprouvette de laboratoire (émission acoustique). L'objectif est d'étudier les relations entre l'activité sismique, dont la source est la propagation de fractures à petite échelle, et le comportement mécanique macroscopique, au cours d'essais de compression uniaxiale et triaxiale (Figure 3). En particulier, on s'intéresse aux modifications des propriétés macroscopiques du matériau (endommagement élastique). On réalise parallèlement des mesures de vitesses des ondes sismiques en cours de sollicitation, pour estimer l'amplitude et l'anisotropie de l'endommagement.

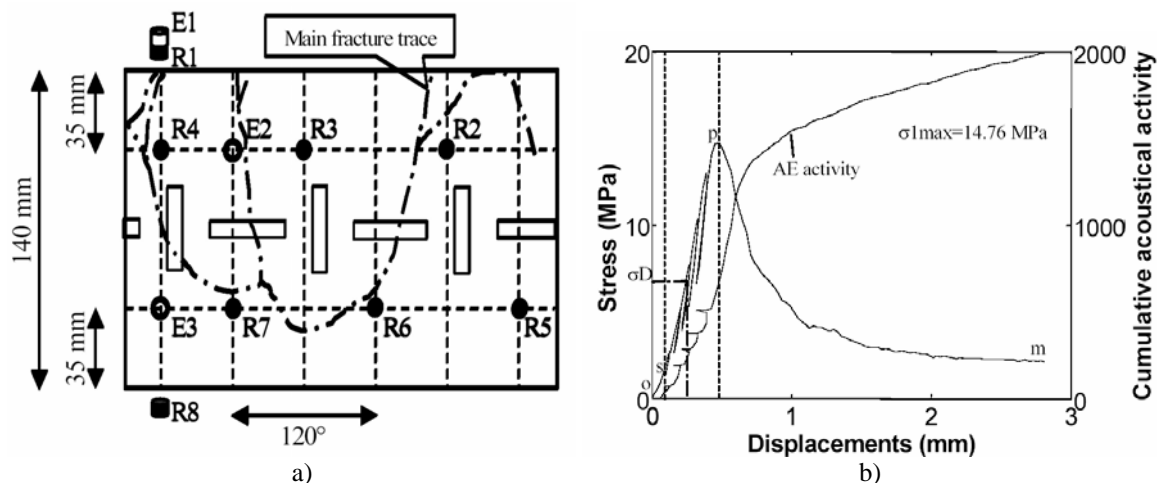


Figure 3 : a) Instrumentation acoustique et de déformation d'une éprouvette cylindrique de minerai de fer et trace de la surface de rupture (vue dépliée). b) Comportement mécanique et activité acoustique du même échantillon soumis à une compression uniaxiale.

Cette recherche est centrée sur les matériaux impliqués dans les problèmes de stabilité des cavités souterraines et, plus particulièrement, d'effondrements liés aux anciennes mines de fer abandonnées en Lorraine. Ces résultats sont comparés à des données issues d'expérimentations in-situ à plus grande échelle de chutes de blocs provoquées (Figure 4) et

d'ennoyage, réalisées dans le site pilote de Tressange, au sein d'une mine de fer, au cours desquelles une écoute acoustique a été réalisée. L'objectif est de tester la pertinence et la faisabilité d'un changement d'échelle entre les observations en laboratoire et in situ (Thèse de J. Wassermann), en particulier pour vérifier si les précurseurs de la rupture mis en évidence en laboratoire peuvent s'appliquer à une échelle plus grande.

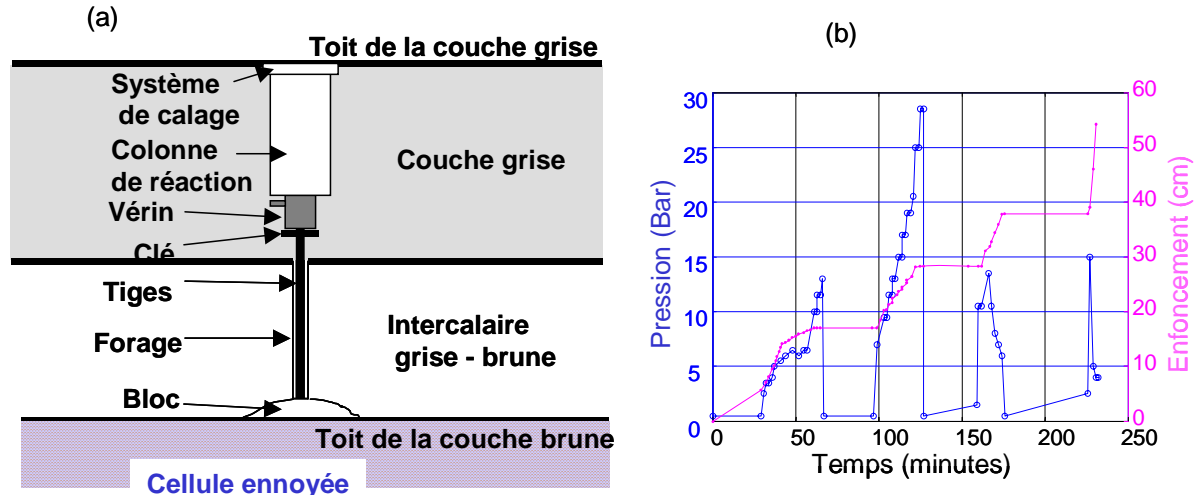


Figure 4 : a) Schéma du dispositif expérimental de l'expérimentation de chute provoquée de blocs ; b) les quatre cycles chargement-déchargement et l'enfoncement des tiges dans le forage.

Au cours de l'ennoyage, une expérience de chute de bloc provoquée par enfoncement d'une tige métallique dans un forage situé au-dessus de la zone expérimentale a été réalisée. Celle-ci a permis de caractériser les enregistrements sismiques liés à une chute de bloc (Figure 4). Par comparaison avec les données enregistrées pendant l'ensemble de l'ennoyage, il a été possible d'identifier les événements liés à des chutes de blocs et ceux dont l'origine est la sollicitation hydromécanique des piliers.

En parallèle de cette recherche des essais de fluage ont été menés sur des échantillons de minerai de fer soumis à des variations d'hygrométrie. Ils sont détaillés en section 3.3.2.

1.2. Sismicité des versants instables

Collaborations : G. Senfaute (LAEGO-Ineris), J.R. Grasso (LGIT Grenoble), J.L. Got (LGIT Chambéry), C. Scavia (Politecnico Turin), Y. Guglielmi (Geosciences azur), S. Gaffet (Geosciences azur).

1 thèse en co-tutelle avec le politecnico de turin (Valeria Saetta, 2004).

Ref. : 1.2, 1.9, 2.1, 3.4, 5.3, 6.3, 6.4, 6.7

- Projet national ACI CATNAT : Sismicité et mécanique des versants rocheux instables : Mesure, expérience et simulation

Laboratoires participants :

- LAEGO Ecole des Mines de Nancy
- Laboratoire de Géosciences -Université de Franche Comté (Besançon),
- LGIT (Grenoble-Chambéry)
- LIRIGM (Grenoble)
- Politecnico de Turin

Ce projet a été soutenu pour 3 ans (2000-2002) par l'INSU dans le cadre des Actions Concertées Incitatives. L'objectif de cette recherche était d'améliorer la compréhension du comportement des versants rocheux instables en recourant conjointement à l'écoute sismique

in-situ, à l'expérimentation en laboratoire et à la simulation numérique. Nous avons associé l'analyse mécanique (relation contrainte-déformation) à l'échelle macroscopique, et l'analyse de la sismicité, qui donne accès à la dynamique des processus à l'échelle locale. La recherche a permis d'appliquer à l'étude des versants rocheux des résultats issus d'autres champs : expérimentation en laboratoire, sismicité à l'échelle des massifs rocheux (mines) ou de la croûte terrestre, simulation numérique de la sismicité. Cette recherche s'appuie sur trois sites d'étude : Séchilienne (Isère), La Clapière (Alpes Maritimes) et Coaraze (Alpes Maritimes). Ces trois sites présentent toutes les étapes de l'évolution d'un versant rocheux fissuré vers la rupture : déformation élastique initiale à Coaraze, déformation inélastique diffuse à Séchilienne, déformation inélastique localisée à la Clapière.

Cette recherche a été coordonnée avec le projet mené par Y. Guglielmi portant sur les instabilités gravitaires (PNRN-INSU). Un colloque de deux jours regroupant les participants à ces deux projets, et ouvert au reste de la communauté scientifique, a été organisé en janvier 2002 (80 participants).

Suite à la bonne appréciation de ce projet par le comité scientifique de l'INSU, il m'a été demandé de participer à l'élaboration d'un projet transversal sur l'auscultation des instabilités gravitaires, en co-responsabilité avec Christophe Delacourt, ENS Lyon, et Olivier Maquaire, IPG Strasbourg. Ce projet est soutenu par l'ACI pour 2002-2005.

- Projet national ACI CATNAT : SAMOA – Surveillance et Auscultation de Mouvements Gravitaires Alpains

Laboratoires participants :

- BRGM (Orléans)
- Géosciences Azur (Nice)
- Géosciences Rennes
- LAEGO Nancy
- Laboratoire de Géosciences -Université de Franche Comté
- LGIT Grenoble - Chambéry
- LHA Le Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon
- LIRIGM Grenoble
- Laboratoire de Sciences de la Terre UCBL & ENS-Lyon
- Institut de Physique du Globe de Strasbourg (UMR 7516 CNRS-ULP)

Ce projet a pour objectif d'associer plusieurs méthodes d'auscultation pour l'étude des mécanismes de déformation des instabilités gravitaires. En effet, l'association de ces différentes techniques, de manière concertée et sur un même site, présente un potentiel très fort d'amélioration de la compréhension des instabilités de versants. Nous proposons de tester, de valider et de coupler les méthodologies d'auscultation (sismique réfraction, tomographie sismique, onde de surface, bruit de fond sismique, SASW, résistivité, TDEM, Géoradar, RMP, traçage hydrique, imagerie optique aérienne et fixe, géodésie terrestre, écoute sismique) sur de sites ateliers, très bien documentés : le glissement rocheux de "La Clapière" (Alpes-Maritimes), représentatif des mouvements gravitaires rigides, et le glissement coulée de "Super Sauze" (Alpes de haute Provence), représentatif des mouvements gravitaires visqueux. Tout au long de ce projet, est constituée et enrichie une base de données techniques synthétisant le potentiel et les limitations de chacune des méthodes ainsi que leur complémentarité. Un serveur proposant l'intégralité des données obtenues par l'ensemble des participants au projet a été mise en service à l'automne 2003. Chaque année, un séminaire de deux jours est organisé, (Barcelonnette en octobre 2003, et Grenoble en février 2004) qui permet de présenter les développements méthodologiques et les données acquises à tous les participants du projet.

1.2.1. Ecoute sismique de deux versants instables de grande ampleur : La Clapière (Alpes Maritimes) et Les Ruines de Séchillienne (Isère)

Collaborations : G. Senfaute (LAEGO-Nancy), J-R Grasso (LGIT-Grenoble), J-L Got (LGIT-Chambéry), S. Gaffet (Geoscience azur).

Ref.: 5.3, 6.3, 6.4, 6.7

Le site de La Clapière est situé à 90 km au nord de Nice, à l'aval de Saint Etienne de Tinée. Il affecte le versant en rive droite de la vallée de la Tinée. Le suivi de l'activité sismique du versant est réalisé, depuis 1991, par une station avec deux capteurs sismiques, localisés à proximité de la limite nord du versant instable. Les données analysées (fournies par le CETE de Nice) couvrent plusieurs périodes de quelques mois entre janvier 1996 et août 1998, soit environ 11000 enregistrements. L'analyse a consisté d'abord à discriminer les signaux ayant pour origine la déformation interne du versant des signaux d'origine externe (séismes, chutes de bloc, sources anthropiques,...). L'analyse des propriétés statistiques des signaux sismiques montre des similarités avec les séismes observés à l'échelle de la croûte terrestre et du laboratoire : loi de Gutenberg-Richter, distribution en loi puissance de l'énergie des signaux (Figure 5a) ; regroupement temporel en essaim indiqué par l'intégrale de corrélation temporelle (Figure 5b).

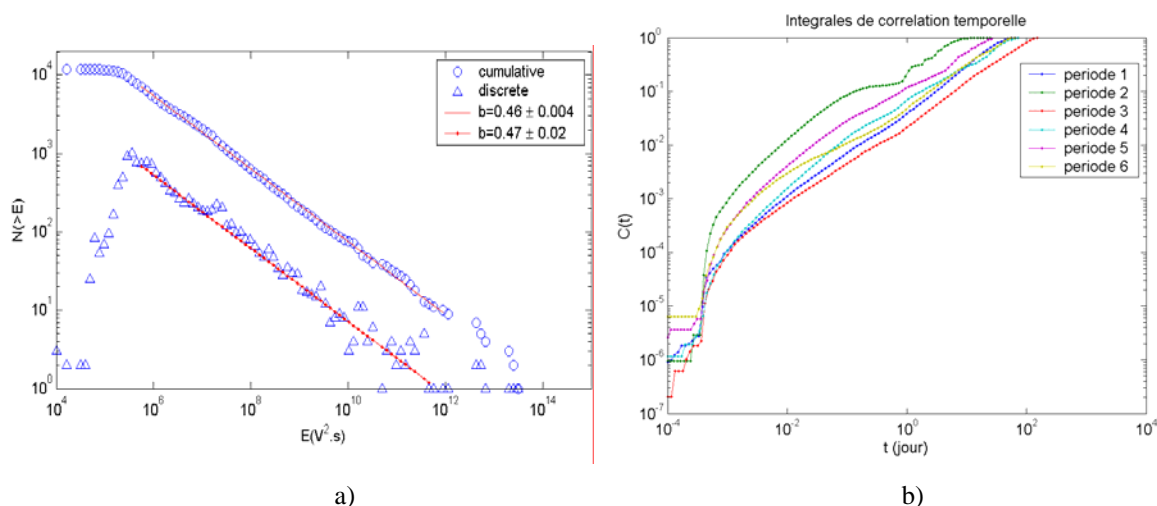


Figure 5 : Distribution d'énergie (a) et distribution temporelle (b) des événements micro-sismiques enregistrés sur une période de deux ans sur le site de la Clapière.

Dans le cadre de l'ACI SAMOA, Le site de La Clapière a été l'objet d'une instrumentation sismique large bande, associant deux antennes sismologiques dans des gammes de fréquences différentes (0.1-10 Hz et 10-1000 Hz). Le réseau basse fréquence a été déployé de juillet à novembre 2003 (cordonné par S. Gaffet, Géoscience-azur). Le réseau haute fréquence a été mis en service en juillet 2003 et fonctionne en continu depuis (cordonné par JL Got, LGIT Chambéry). L'objectif est d'associer des mesures donnant des informations très locales (réseau HF) et d'autres donnant accès à une surveillance plus globale (réseau BF) car plus pénétratives en particulier dans le contexte d'un milieu très fracturé en surface.

Le site des Ruines de Séchillienne est localisé dans les alpes françaises à proximité de Grenoble et affecte la rive droite de la Romanche. La zone la plus active du versant implique un volume de roche estimé à environ 3 millions de m^3 . Un réseau temporaire constitué de 6 stations sismologiques (station Hathor3 + capteur tridimensionnel 2 Hz) a été déployé sur le site de Séchillienne pendant 4 mois, d'avril à juillet 2001. Cette expérience d'écoute temporaire a permis d'enregistrer un grand nombre de signaux, plus de 20 000 enregistrements, dont la majorité ont pour origine la déformation du versant (Figure 6).

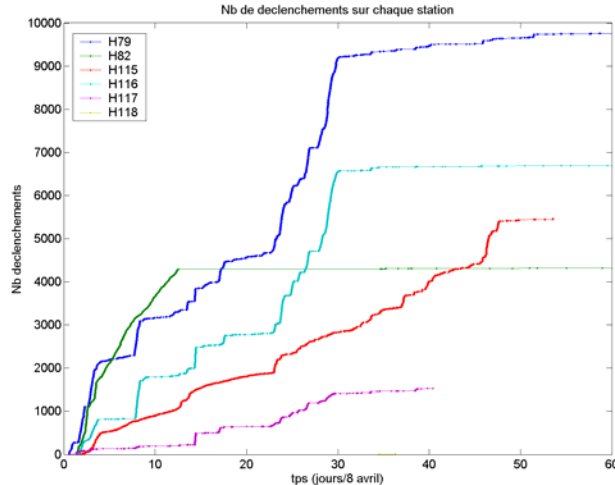


Figure 6 : Nombre d'événements sismiques enregistrés sur chaque station en fonction du temps.

Sur le même site, un système d'écoute sismique à haute fréquence (10 kHz) a été installé dans une galerie de reconnaissance (expérience pilotée par JL Got, LGIT-Chambéry) et donne accès à des informations complémentaires (sources plus petites et plus proches à l'intérieur du massif). On observe une corrélation temporelle entre activités sismiques basse fréquence et haute fréquence. On observe également pour ces deux types de mesure une corrélation entre l'activité sismique et la déformation du massif, les stations les plus proches de la zone de déformation rapide mesurant la plus forte activité sismique.

Ces premiers résultats montrent un comportement complexe de la sismicité induite par la déformation d'un versant de grande ampleur. Ces données ont permis, en outre, de comparer l'activité sismique et les vitesses de déplacement des cibles placées à la surface de la zone instable, dans le cas de la Clapière. Une première analyse succincte a permis de mettre en évidence une corrélation entre l'activité sismique et la vitesse de déformation pour certaines périodes mais pas de manière systématique. La suite de la recherche consistera à analyser plus finement l'activité sismique et ses relations avec la déformation du versant afin de déterminer pourquoi cette corrélation n'est pas systématique (raisons d'une déformation sismique/asismique). La même approche sera réalisée sur le cas des Ruines de Séchilienne.

1.2.2. Ecoute sismique large bande d'un glissement-coulée – Site de Super Sauze

Collaborations : S. Gaffet (Géosciences-Azur, Nice), J.-P. Malet (Faculty of Geosciences, Utrecht, NL), O. Maquaire (Geophen / LETG, Université de Caen).

Suite aux travaux menés sur la Clapière et Séchilienne, nous avons envisagé de développer une instrumentation large bande, pour le suivi de différents types d'instabilité gravitaire. Une première expérience a été menée, au cours de l'année 2004, sur le site de Super-Sauze, Alpes de Hautes Provence. Une station sismologique large bande (10 Hz – 90 s) a été installée au cœur de la coulée boueuse afin d'en suivre l'activité de déformation. Je présente ci-dessous des résultats très préliminaires qui montrent l'intérêt d'une telle instrumentation. Un capteur large bande a été installé sur un éperon rocheux autour duquel le matériau impliqué dans le glissement coulée (marnes noires du callovo-oxfordien) s'écoule. L'écoute temporaire s'est déroulée sur plusieurs mois entre mai et septembre 2004. Du fait d'un certain nombre de problèmes techniques, seule une période d'une douzaine de jours a fourni des données exploitables. Un pluviomètre et un extensomètre, se trouvent à proximité de la station sismologique et permettent d'observer les éventuelles corrélations entre pluviométrie, déplacement et activité sismique. La Figure 7 montre ces différents résultats. Les mesures de déplacement sont brutes. La pluviométrie a été cumulée. L'activité sismique a

été estimée en calculant une RMS glissante (durée 1 heure) dans différentes bandes de fréquence (0.01-0.1 Hz, 0.1-1 Hz, 1-10 Hz) et en distinguant la composante verticale et horizontale. Les valeurs sont normalisées par la RMS totale.

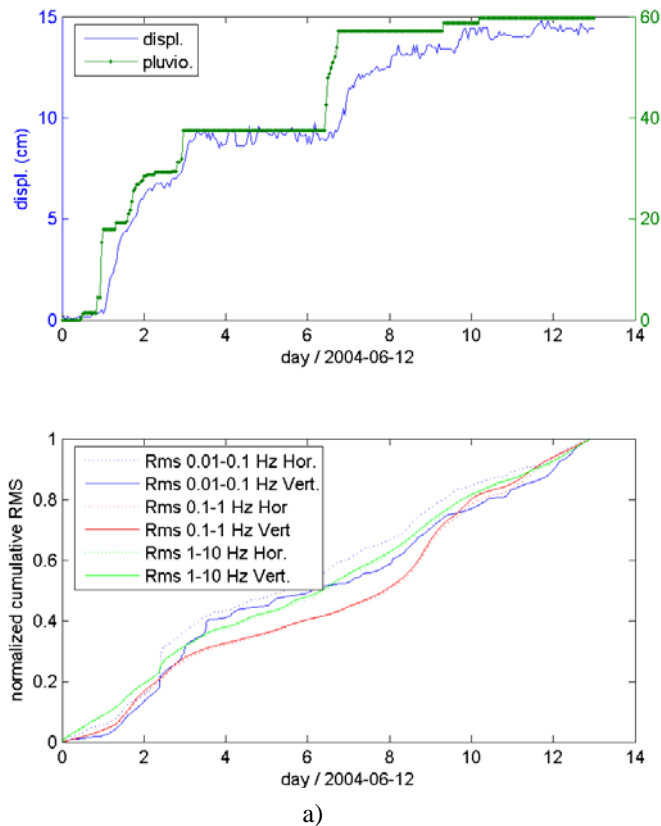


Figure 7 : a) Haut : déplacement et pluviométrie enregistrés sur le site de Super Sauze. Bas : RMS cumulée dans trois bandes de fréquence différentes. b) Haut : Stéphane Gaffet en phase d'installation de la station sismologique sur l'éperon rocheux autour duquel se déforme le glissement coulée. Bas : Stries de frottement entre la coulée et l'éperon.

On observe que la déformation de la coulée est fortement corrélée à la pluviométrie cumulée ce qui est avéré sur ce site depuis de nombreuses années y compris par d'autres type de mesures tel que le suivi GPS [Malet *et al.*, 2002]. L'activité sismique montre des variations importantes (d'environ un ordre de grandeur) au cours de cette même période. Les bandes de fréquences 0.01-0.1 Hz et 0.1-1 Hz montrent les variations les plus importantes. La corrélation temporelle entre déplacement/pluviométrie et activité sismique apparaît assez nettement. Elle peut être attribuée au frottement de la coulée sur l'éperon rocheux. L'effet du bruit de chute de la pluie comme cause de corrélation peut être exclu. On observe, en effet, que les « crises » sismiques s'étendent sur des durées dépassant largement celles des averses. Ces premiers résultats montrent le potentiel de l'écoute sismique de versants à comportement visco-plastique alors qu'ils sont généralement réputés asismiques. A notre connaissance, il s'agit de la première expérience de ce genre sur ce type d'instabilité gravitaire.

La suite de ce travail consistera d'une part à caractériser mieux le bruit de fond sismique (polarisation, rapport H/V, pic de fréquence) et d'autre part à rechercher la présence d'événements sismiques transitoires et étudier leurs caractéristiques (amplitude, énergie, contenu fréquentiel, répartition temporelle).

1.2.3. Comportement précurseur de l'activité sismique d'une falaise avant un effondrement rocheux

Collaborations : J-R Grasso (LGIT-Grenoble), G. Senfaute (LAEGO-Nancy)

Ref.: 1.2, 2.1, 5.3, 6.3, 6.4, 6.7

Ce travail porte sur l'analyse de la sismicité observée avant l'effondrement d'une falaise de craie, en Normandie. La falaise de Mesnil-Val a été instrumentée par Gloria Senfaute dans le cadre du projet européen PROTECT (Figure 8). L'instrumentation a été opérationnelle à partir de janvier 2002. Un effondrement rocheux d'un volume d'environ 2000 m³ s'est produit le 23 juin 2002 en plein cœur du réseau d'écoute micro-sismique ce qui nous a une étude fine des propriétés de la sismicité enregistrée dans les quelques heures qui ont précédé l'effondrement.

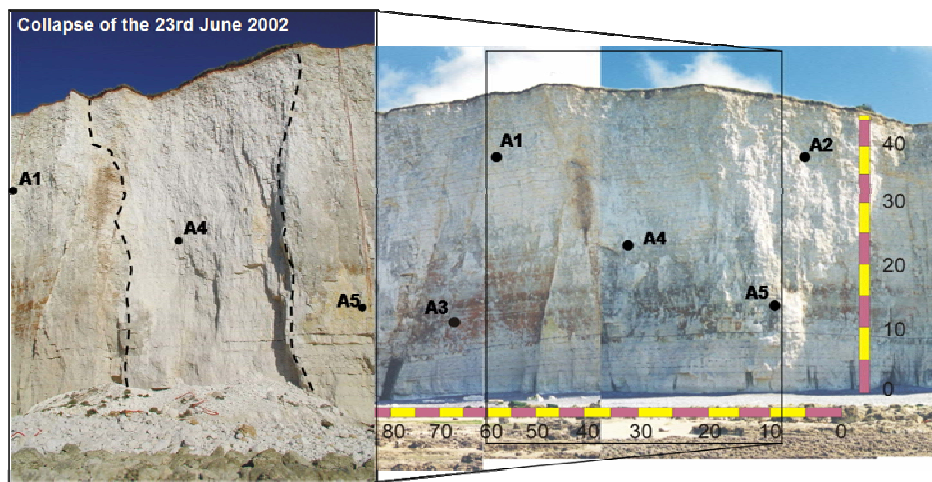


Figure 8 : Instrumentation sismique de la falaise de craie de Mesnil-Val, Normandie, et cicatrice de l'effondrement du 23 juin 2002.

L'analyse des propriétés statistiques de la sismicité a montré une évolution particulière à l'approche de la rupture. La distribution d'énergie des événements suit une loi puissance avec un exposant de 0.5, lorsqu'on considère l'ensemble de la période observée. En calculant la distributions pour des fenêtres glissantes on observe une diminution de l'exposant b associée à une augmentation de la taille maximale d'événement de plusieurs ordres de grandeur (Figure 9 et Figure 10a). Nous avons également observé un comportement critique (accélération en loi puissance du nombre d'événements et de l'énergie sismique libérée) à l'approche de la rupture (Figure 10b).

Cette étude permet de proposer ces comportements comme des précurseurs de la rupture, que l'on peut chercher à appliquer sur d'autres objets géologiques : failles sismiques, glissements de terrain, volcans. Le type d'accélération sismique (loi puissance) observé sur ce site permet de considérer la rupture comme un point critique, pour lequel on peut appliquer les concepts de transition de phase critique issus de la physique statistique. La théorie du point critique prévoit une distribution de taille des événements en loi puissance avec un exposant constant et une coupure exponentielle dont la taille diverge à l'approche du point critique [Stanley, 1971]. Des tests sur un catalogue synthétique ont montré que la diminution de b pouvait n'être qu'apparente et provenir d'une augmentation de la taille de coupure. La dimension réduite de notre catalogue ne nous permet pas de vérifier cette hypothèse empiriquement.

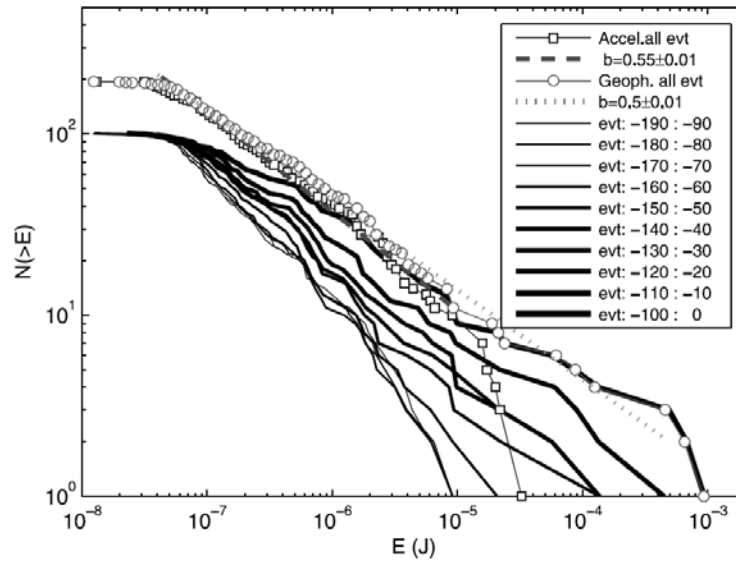


Figure 9 : Distributions cumulée d'énergie reçue au capteur sur l'accéléromètre (carrés) et le géophone (cercle). Les traits continus indiquent les distributions observées sur le géophone pour des fenêtres glissantes de 100 événements avec un décalage de 10 événements. L'épaisseur du trait augmente avec la proximité de la rupture.

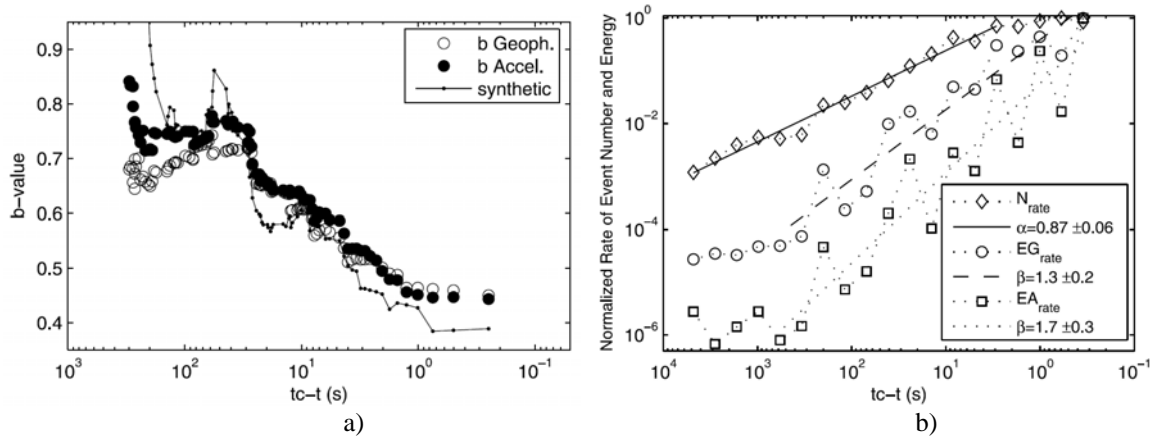


Figure 10 : a) Evolution temporelle de l'exposant b avant l'effondrement calculé pour le géophone, l'accéléromètre et pour un catalogue synthétique avec un exposant constant de 0.5 et une coupure exponentielle dont la taille diverge à l'approche de la rupture. b) Taux d'évènements (N_{rate}) et taux d'énergie sismique reçu sur un géophone (EG_{rate}) et sur un accéléromètre (EA_{rate}) en fonction du temps à la rupture ($tc-t$), tc étant le temps de l'effondrement. L'allure en loi puissance indique un comportement critique.

Par ailleurs, ces résultats sont comparables à ceux observés en laboratoire au cours d'essai de fluage sur des matériaux hétérogènes au cours de la phase tertiaire [Nechad *et al.*, 2004] et à ceux obtenus numériquement par le modèle de fluage que j'ai développé (voir section 1.4). Ceci permet de poser l'hypothèse que la rupture observée sur cette falaise est le résultat ultime d'une phase de fluage tertiaire. Ce type de comportement est comparable à l'accélération de la déformation de Benioff qui a été proposée comme précurseur possible pour les séismes [Jaume and Sykes, 1999].

1.3. Modélisation numérique du comportement mécanique des roches et de la sismicité associée

Cette partie de ma recherche concerne la simulation numérique du comportement des roches et de la sismicité associée. Elle a pour objectif de chercher les conditions et les paramètres en mesure d'expliquer les observations expérimentales aussi bien en laboratoire que in situ. En particulier, je cherche à mettre en évidence ce qui conditionne le comportement fragile ou ductile du comportement, comment l'endommagement progressif peut aboutir à la rupture macroscopique et enfin les conditions d'apparition des nombreuses lois d'échelles observée empiriquement. Je présente d'abord un modèle qui reproduit un certain nombre des observations complexes du comportement des roches, sans prise en compte l'effet du temps. Je présente ensuite une évolution de ce modèle permettant de simuler le comportement en fluage des roches.

1.3.1. Modélisation numérique de l'endommagement et de la sismicité associée

Collaboration : J-R Grasso (LGIT-Grenoble)

Ref. : 1.4, 1.5, 1.7, 3.6, 3.7

J'ai développé un modèle numérique du comportement mécanique des roches et de la sismicité émise lors de la sollicitation mécanique, basé sur un endommagement progressif et une interaction élastique. Ce modèle permet de simuler de nombreuses observations expérimentales : des comportements macroscopiques variés, allant du fragile au ductile associé à un endommagement allant du localisé au diffus; une sismicité associée à un comportement macroscopique non-linéaire; une distribution de la taille des événements sismiques en loi puissance (Figure 12). Le paramètre de contrôle de ces différentes observations est l'angle de frottement interne, ϕ , utilisé dans le critère d'endommagement [Amitrano, 1999].

Ce modèle a ensuite évolué pour intégrer un critère d'endommagement non-linéaire, en mesure de rendre compte de la décroissance de l'angle de frottement interne observé expérimentalement [Amitrano, 2003]. Ce modèle est ainsi en mesure de reproduire la transition fragile/ductile induite par l'augmentation de pression de confinement tel que cela est observé pour les roches (Figure 12a). Il simule également la dépendance de l'exposant b de la loi de Gutenberg-Richter vis-à-vis de la pression de confinement (Figure 12b), en accord avec les observations de laboratoire.

Ce modèle a ainsi été confronté avec succès aux observations de laboratoire [Amitrano, 2003]. Il permet également de reproduire des variations de propriétés statistiques observées à l'échelle de la croûte terrestre [Mori and Abercombie, 1997; Gerstenberger et al., 2001; Mekkawi et al., 2002; Sue et al., 2002].

Il constitue ainsi un outil d'interprétation mécanique de la sismicité naturelle à des échelles variées (massif rocheux, croûte terrestre). D'autre part, ce modèle, basé sur un comportement élémentaire simple, permet de faire émerger des propriétés macroscopiques qui ne sont pas introduites à l'échelle élémentaire mais qui résultent de l'interaction entre les éléments. De ce point de vue, il permet d'aborder le phénomène de déformation et de rupture des roches comme un système complexe [Amitrano, 2004], caractérisé par des propriétés macroscopiques émergentes (comportement non-linéaire, distribution en loi puissance des événements, structure fractale de l'endommagement).

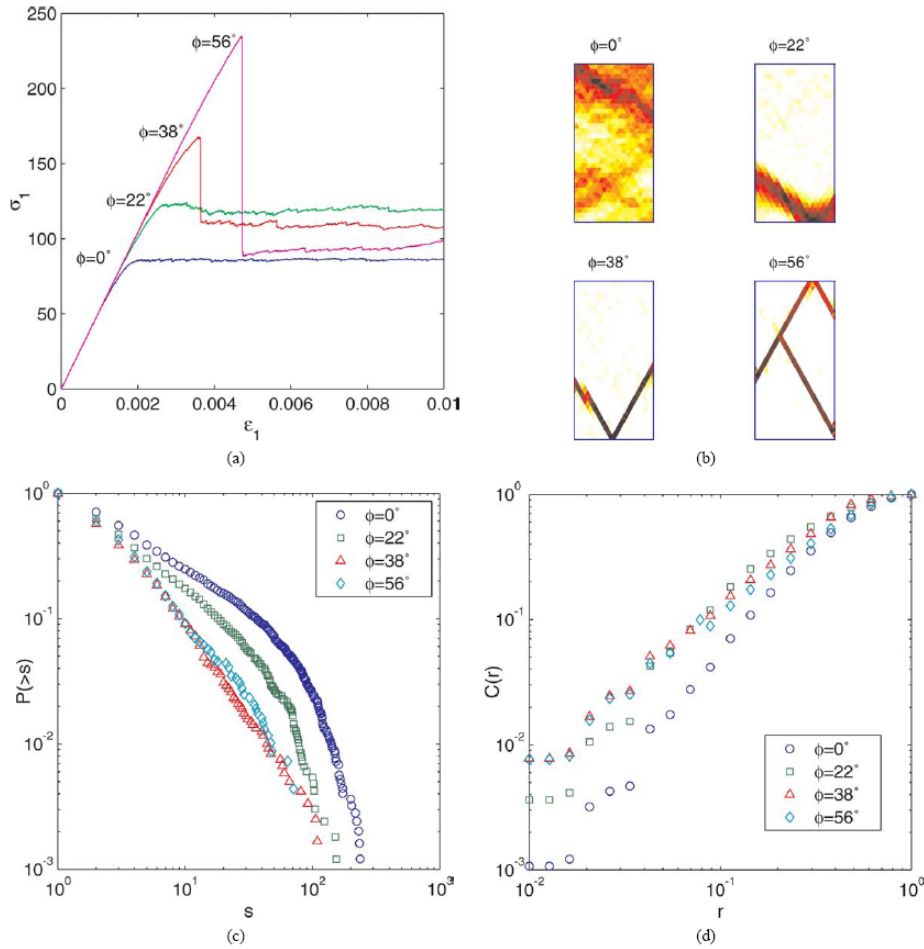


Figure 11 : Résultats de simulation pour différentes valeurs de ϕ . (a) Comportement mécanique macroscopique, (b) endommagement final du modèle, (c) distribution de la taille des avalanches, (d) intégrale de corrélation spatiale de l'endommagement.

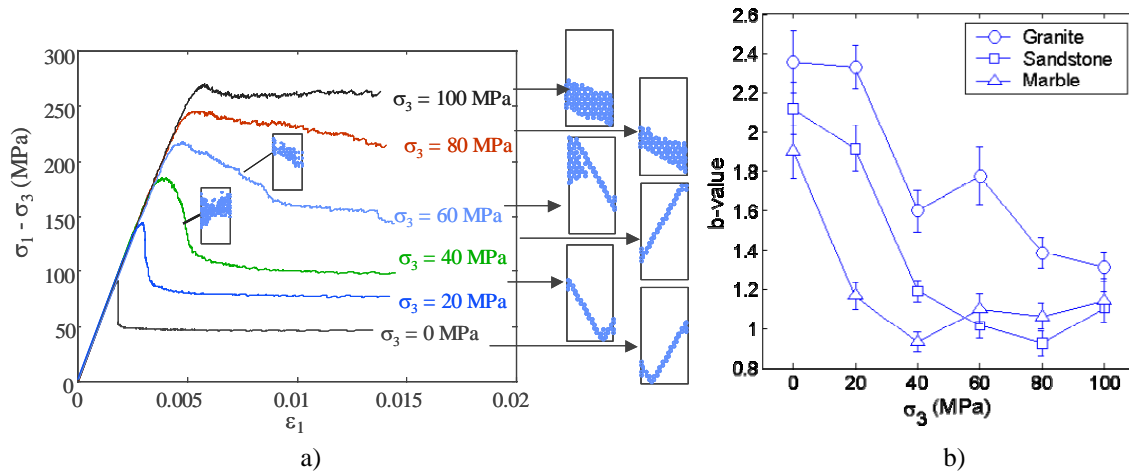


Figure 12 : a) Comportement mécanique et localisation de l'endommagement simulés numériquement pour différentes pressions de confinement σ_3 . Le matériau simulé est un calcaire. b) Variation de l'exposant b de la loi de Gutenberg-Richter en fonction de la pression de confinement pour différents matériaux simulés.

1.3.2. Modélisation numérique du fluage des roches par endommagement dépendant du temps

Collaboration : A. Helmstetter (Lamont-Doherty Laboratory, Columbia University)

Ref : 1.1

Le modèle présenté précédemment est limité à un comportement indépendant du temps, ce qui réduit son application à des cas où l'évolution de l'endommagement est liée à l'augmentation de la contrainte. Un grand nombre d'objets géologiques, en particulier les massifs rocheux, sont soumis à des sollicitations quasiment constantes à long terme. Leur évolution vers la rupture, dans ces conditions, ne peut être simulée qu'en tenant compte du temps et en considérant une évolution des caractéristiques mécaniques pour des contraintes inférieures à la contrainte de rupture instantanée. Le choix qui a été fait ici se base sur des données de laboratoire et leur formalisation théorique. L'analyse de données publiées dans la littérature montre que le temps nécessaire pour atteindre la rupture à contrainte constante dépend fortement de la valeur de la contrainte. Empiriquement, on peut observer une relation

de type loi puissance, $t_{failure} = t_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-b'}$, ou loi exponentielle, $t_{failure} = t_0 \exp\left(-b \frac{\sigma}{\sigma_0}\right)$, σ/σ_0

étant la contrainte appliquée normalisée par la contrainte de rupture instantanée, t_0 et b étant des constantes. La formulation exponentielle dérive de la théorie de la fissuration sous-critique par corrosion sous contrainte [Swanson, 1984; Atkinson, 1991], tandis que la formulation en loi puissance est purement empirique. Du fait de leur similitude et des faibles variations de σ/σ_0 accessibles expérimentalement, il y a peu de différence de représentativité statistique entre ces deux lois [Amitrano and Helmstetter, 2005]. Le choix entre ces deux expressions n'induit pas de différences significatives dans les simulations numériques.

Cette loi de durée de vie a été intégrée dans le modèle d'endommagement progressif présenté à la section précédente afin de déterminer le temps nécessaire pour qu'un élément s'endommage. Cet endommagement rend l'élément plus déformable et rend ainsi la déformation du modèle dépendante du temps. Les résultats de simulation numérique sont présentés dans les figures 13 à 17.

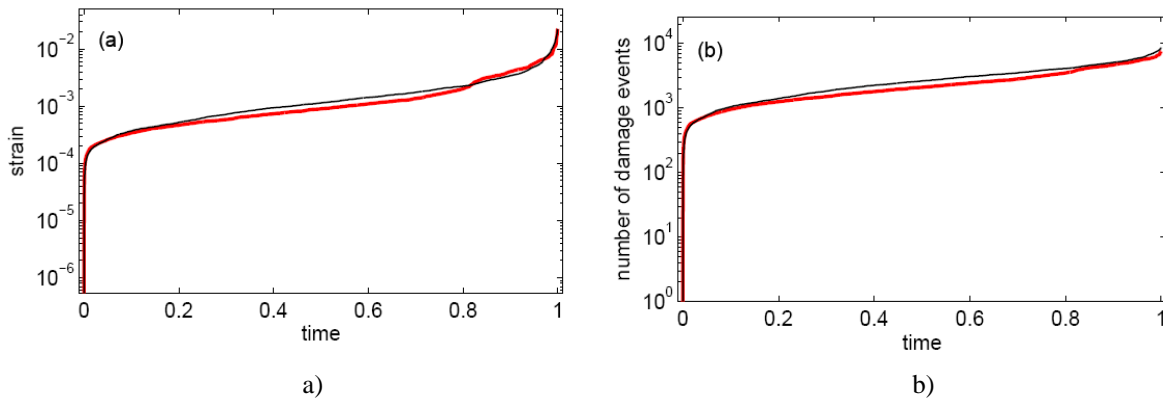


Figure 13 : Résultats de modélisation numérique d'un essai de fluage à contrainte constante. $\sigma/\sigma_0 = 0.75$ pour une loi de durée de vie en loi exponentielle (rouge) et en loi puissance, avec $b=40$. a) Déformation axiale en fonction du temps. b) Cumul d'événements sismiques en fonction du temps. Le temps est normalisé par le temps à la rupture.

La Figure 13a montre que la déformation macroscopique fait apparaître une phase de fluage primaire (diminution du taux de déformation) et une phase de fluage tertiaire (augmentation du taux de déformation). Le même type de comportement est observé pour le taux d'événement d'endommagement (Figure 13b) et le taux d'énergie dissipée (non

représentée). Le choix de la loi de durée de vie (exponentielle ou loi puissance) n'as pas d'effet notable.

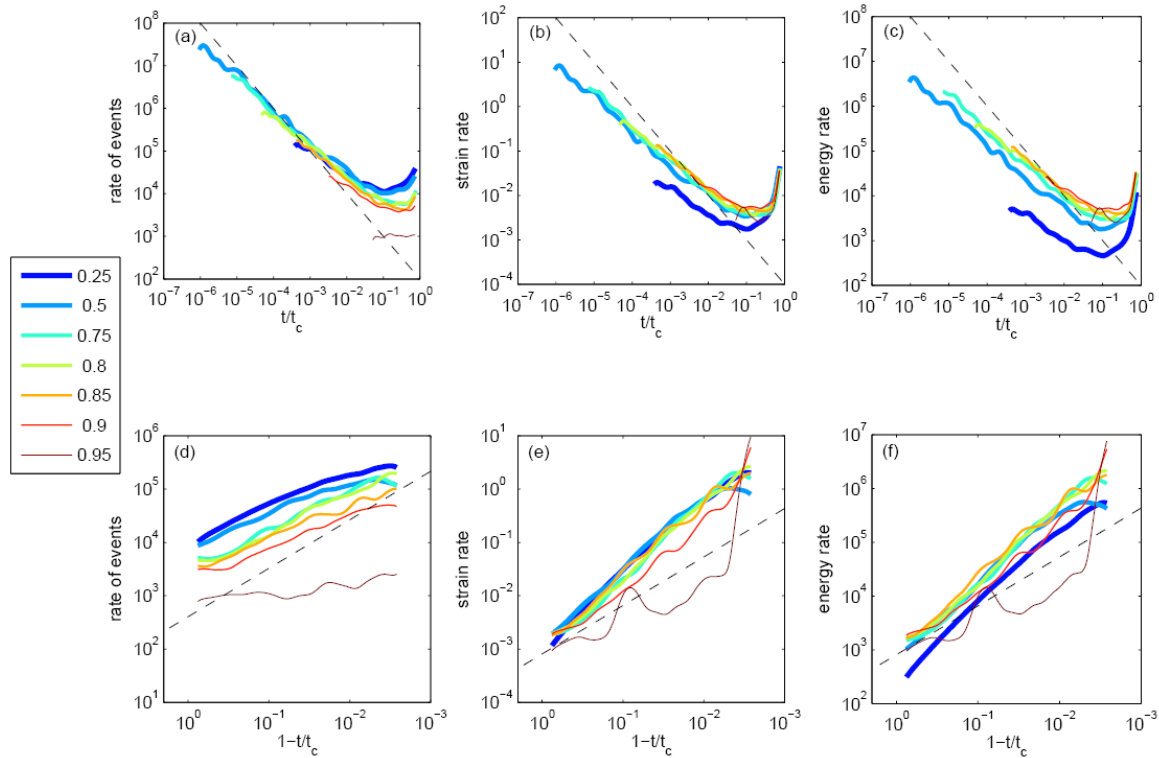


Figure 14 : Résultats de modélisation numérique d'essais de fluage à différentes valeurs de contrainte macroscopique σ/σ_0 (indiquée dans la légende). a) b) et c) présentent respectivement le taux d'événement, le taux de déformation axiale et le taux d'énergie dissipée en fonction du temps normalisée par le temps à la rupture dans la phase primaire. d) e) et f) présentent les mêmes grandeurs dans la phase tertiaire en fonction du temps à la rupture (axe temporel inversé). Les traits discontinus indiquent une loi puissance d'exposant 1. La loi de durée de vie utilisée est exponentielle avec $b=40$.

Ce comportement se retrouve pour une large gamme de valeur σ/σ_0 (Figure 14). Excepté pour les valeurs élevées de contrainte, on observe, en début de simulation une décroissance en loi puissance des taux d'événement (dN/dt), de déformation ($d\varepsilon/dt$), et d'énergie (dW/dt), avec un exposant de l'ordre de 0.8 pour ces trois grandeurs. Ceci correspond à la loi de d'Andrade [Andrade, 1910] établie initialement pour la déformation des métaux en phase primaire et observé également pour les roches. Pour ce qui concerne le taux d'événement on retrouve la loi d'Omori [Omori, 1894] observée pour les séquences de répliques de séismes. La phase d'accélération suit une loi puissance avec un exposant plus faible pour le taux d'événement (~ 0.8) que pour le taux d'énergie et de déformation (~ 1.3). Ceci est en bon accord qualitatif et quantitatif avec les résultats expérimentaux observés en laboratoire par [Nechad et al., 2004] et avec nos observations in situ concernant la falaise de Mesnil-Val [Amitrano et al., 2005]. L'énergie des événements d'endommagement est distribuée en loi puissance lorsqu'on l'intègre sur l'ensemble de la simulation (Figure 15). Pour les faibles valeurs de contrainte, on observe une distribution étroite dont la moyenne augmente avec le temps. Pour des valeurs de contrainte élevées la distribution est en loi puissance avec un exposant constant au cours du temps.

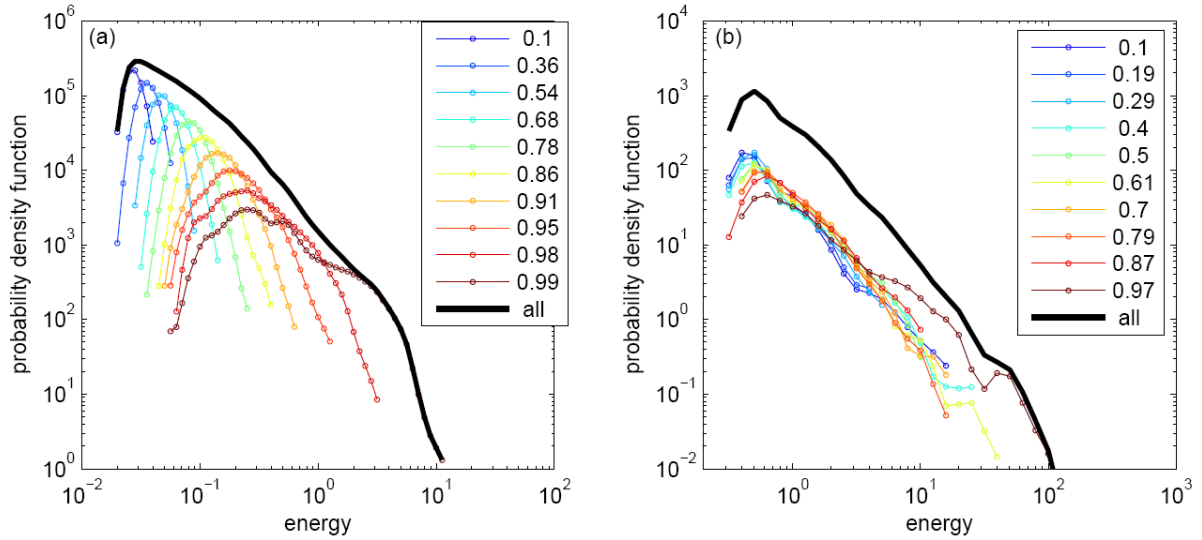


Figure 15 : Distribution de probabilité d'énergie des événements d'endommagement pour deux simulations (durée de vie en loi exponentielle, $b=40$) avec $\sigma/\sigma_0=0.25$ (a) $\sigma/\sigma_0=0.95$ (b). Les courbes en couleur correspondent à des fenêtres de temps successives. Chaque fenêtre contient le même nombre d'événement. La légende donne le temps moyen de la fenêtre normalisé par le temps de rupture. La courbe noire donne la distribution intégrant toute la durée de la simulation.

La Figure 16 montre l'état d'endommagement observé en fin de simulation pour différentes valeurs de contrainte. On observe que cette structure est peu affectée par le choix du paramètre b de la loi de durée de vie (ici exponentielle). L'endommagement se localise en bande dont la largeur dépend de la contrainte. Les contraintes élevées donnent lieu à une bande plus localisée.

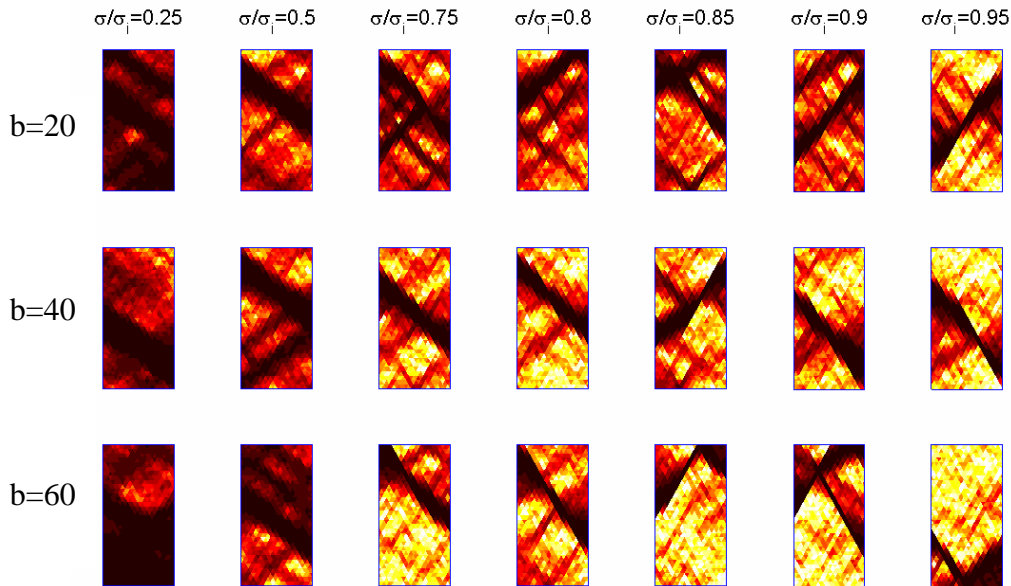


Figure 16 : Etat d'endommagement en fin de simulation pour différentes valeurs de contrainte et de paramètre b de la loi d'endommagement (exponentielle). On observe que l'endommagement se localise d'autant plus que la charge appliquée est importante.

Afin de comprendre le changement de comportement entre la phase primaire et la phase tertiaire, nous avons analysé la structure de l'endommagement au cours de la simulation en calculant le correlogramme de l'endommagement dans différentes directions de l'espace. La Figure 17 montre les correlogrammes obtenus, pour des temps successifs, dans les directions parallèle et perpendiculaire à la bande de localisation de l'endommagement. Ceci a permis de

montrer que la phase primaire correspond à un endommagement non corrélé dans l'espace et isotrope. L'initiation de la phase tertiaire correspond à une augmentation de la longueur de corrélation et à l'apparition d'une anisotropie dans la structure de l'endommagement. Ainsi le type d'interaction entre éléments évolue au cours de la simulation passant d'une interaction isotrope et à faible portée en phase primaire à une interaction à longue portée et anisotrope en phase tertiaire.

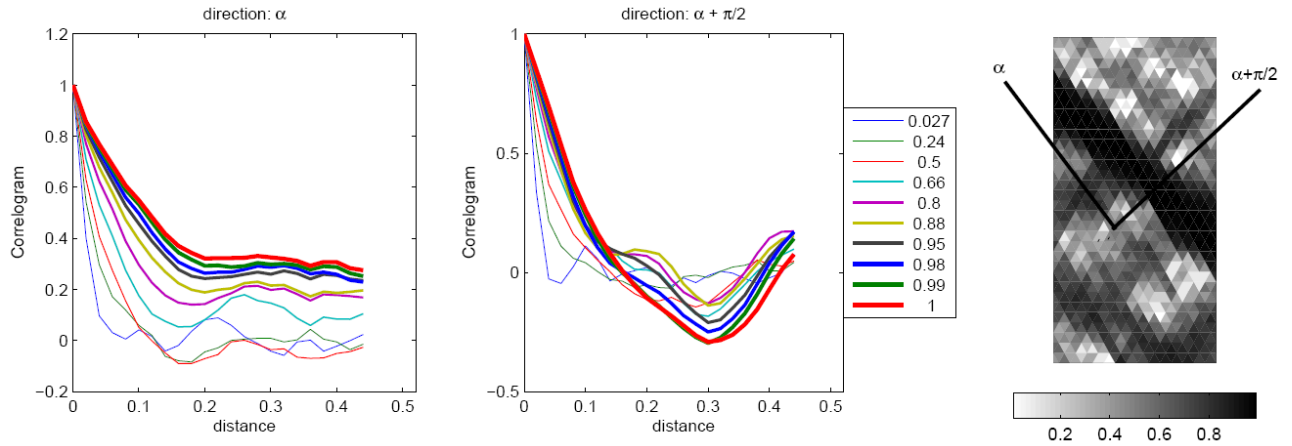


Figure 17 : a) et b) Corrélogrammes de l'endommagement dans la direction de la bande de localisation de l'endommagement (α) et dans la direction perpendiculaire ($\alpha + \pi/2$) à différents temps normalisés par le temps à la rupture. c) carte de l'endommagement ($D=E/E_0$) en fin de simulation. La simulation a été réalisée avec une loi de durée de vie exponentielle ($b=40$) et $s/s_0=0.75$.

Ce modèle montre comment un comportement complexe (fluage primaire et tertiaire, distributions en loi puissance des événements d'endommagement, localisation de l'endommagement) peut émerger d'un comportement élémentaire simple, basé sur un endommagement progressif et une loi de durée de vie établie expérimentalement.

Une application possible de ce modèle concerne les versants rocheux. La Figure 18 montre les résultats de simulation numérique de l'évolution de l'endommagement à l'intérieur d'un versant rocheux de grande ampleur. Les conditions limites sont les suivantes : déplacements verticaux nuls à la base du modèle, déplacements horizontaux nuls sur les limites latérales, force de gravité appliquée à chaque élément.

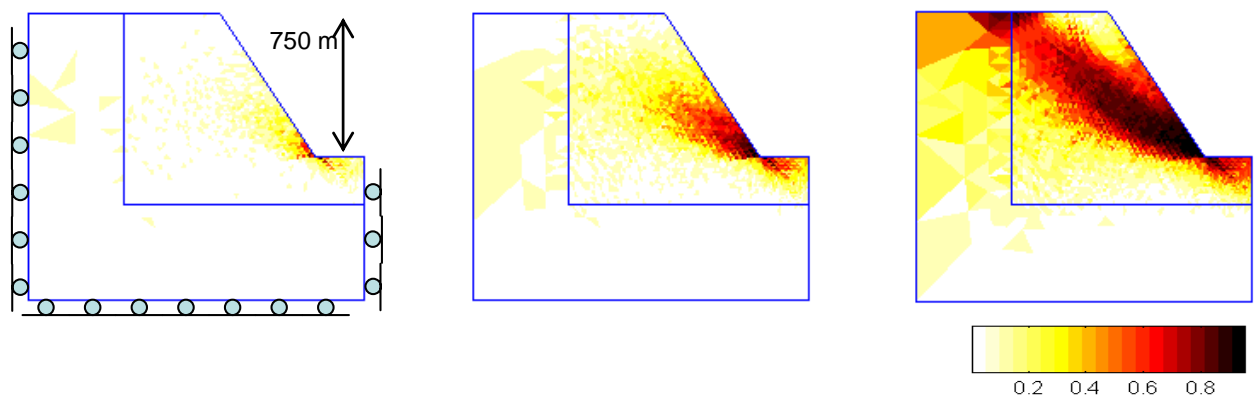


Figure 18 : Etat d'endommagement d'un versant de massif rocheux à trois stades successifs de la simulation numérique. Les conditions limites sont indiquées sur la partie droite. Le chargement est réalisé en appliquant la gravité à l'ensemble des éléments. Le paramètre représenté en échelle de couleur est l'endommagement ($D=E/E_0$).

Cette simulation montre que le processus d'endommagement se concentre d'abord en pied de versant, lieu de la plus forte concentration de contrainte. L'endommagement se

développe ensuite vers l'amont pour aboutir en surface en formant une bande de localisation pouvant constituer une zone de rupture. On retrouve ainsi une structure observée sur certains glissements de terrain de grande ampleur tel que celui de La Clapière. Bien que cette simulation se base sur des hypothèses simplistes (massif intact en début de simulation, géométrie simple et excavation de la vallée instantanée), elle permet de montrer le potentiel de ce modèle pour l'étude des instabilités gravitaires et de leur évolution temporelle. Une telle simulation, basée sur des hypothèses plus réalistes de géométrie et de pré-structuration du versant, est en mesure de fournir des images de champ d'endommagement qui peuvent servir de calage par comparaison avec les images obtenues par investigations géophysiques. Ce résultat peut également servir de base pour un calcul d'écoulement dans un milieu perméable, moyennant la mise en relation de l'endommagement et la perméabilité.

2. Structures, dynamique et invariance d'échelles dans la déformation des roches

Ce thème de recherche s'intéresse aux processus de déformation d'objets géologiques divers (éprouvette de laboratoire, échantillon de faille, versants rocheux instables, exploitations minières, zones sismogènes) en analysant la manière dont les observations peuvent être comparables et transposables à des échelles différentes. Deux sous thèmes peuvent être distingués portant l'un sur les micromécanismes de déformation (observations microscopique) et l'autre sur les invariances d'échelle proprement dites (possibilité d'un changement d'échelle). On cherche, dans chaque cas, à voir quel est le conditionnement mécanique des observations et quelle est l'origine des invariances d'échelle observées.

2.1. Micromécanismes de déformation des roches et structure de l'endommagement

Collaborations : J. Schmittbuhl (IPG Strasbourg), A.M. Boullier (LGIT Grenoble),

Ref. : 1.3, 1.6, 3.2, 6.12

Il s'agit d'une étude des mécanismes de déformation à petite échelle des roches soumises à une sollicitation mécanique en laboratoire (compression triaxiale). On s'intéresse aux propriétés statistiques des surfaces de rupture ainsi qu'à la granulométrie des particules impliquées dans le cisaillement de la surface de rupture (gouge ou cataclasite).

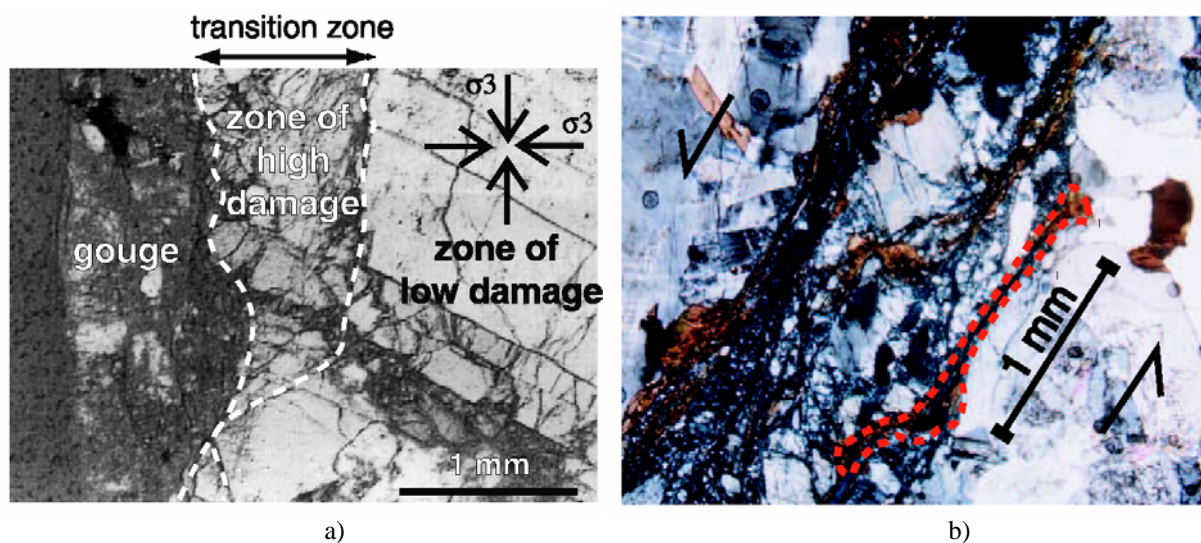


Figure 19 : a) Structure de la zone de fracture d'un échantillon de granite. b) Déformation cataclastique dans la zone de cisaillement. La ligne pointillée entoure une biotite fortement déformée.

Nous étudions, en particulier, l'influence de la pression de confinement et du déplacement tangentiel sur la rugosité des surfaces de rupture et sur la granulométrie de la gouge. Cette étude a montré que la granulométrie de la gouge ainsi que la rugosité des surfaces de rupture sont bien décrites par des distributions en loi puissance révélant une invariance d'échelle de ces deux objets sur plus de trois ordres de grandeurs. On montre, en outre, que les exposants décrivant ces distributions sont sensibles à la fois à la pression de confinement et au cisaillement (Figure 20).

Ces résultats montrent un couplage complexe entre la rugosité et la granulométrie de gouge lors de la sollicitation mécanique d'une zone de rupture, dont la prise en compte dans les modèles de comportement mécanique d'interface pourrait améliorer leur caractère prédictif.

Ces résultats constituent également un point de comparaison pour des observations de structure de déformation issues de la zone de gouge de failles actives [Boullier *et al.*, 2004a; Boullier *et al.*, 2004b] et ils permettent d'envisager de remonter aux conditions mécaniques ayant engendré ces structures. La Figure 21 montre le résultat de l'analyse granulométrique par analyse d'image de deux échantillons provenant l'un d'une zone de fracturation, l'autre d'une zone de cataclasite. Ces deux zones sont caractérisées par des exposants de granulométrie significativement très différents. En se basant sur les résultats de laboratoire, on peut expliquer cette variation d'exposant par une différence d'amplitude du cisaillement ou de contrainte de confinement (différence de profondeur).

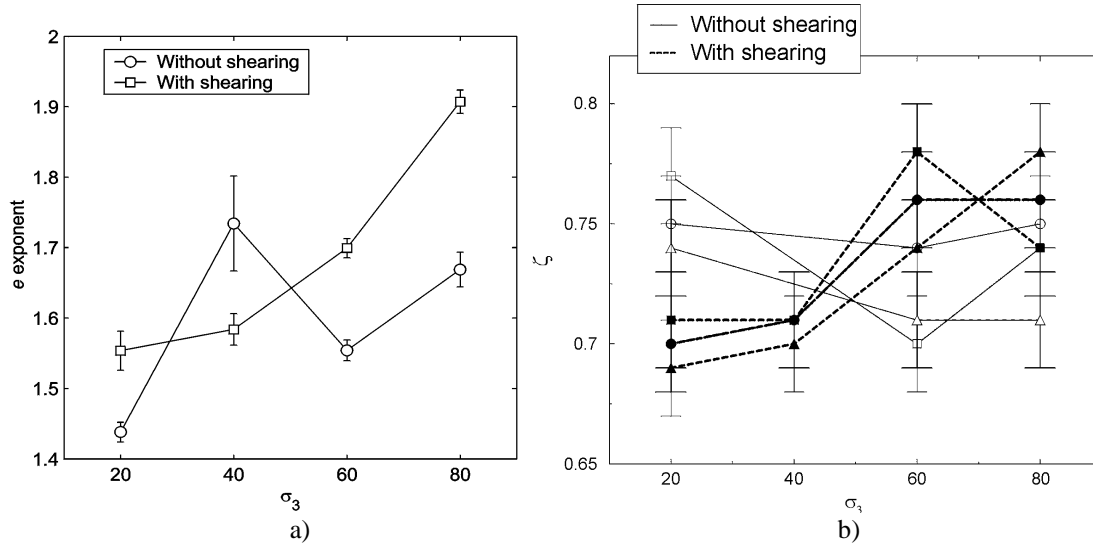


Figure 20 : Exposant de rugosité ζ (a) et de granulométrie e (b) en fonction du confinement σ_3 , pour des essais avec ou sans cisaillement après rupture.

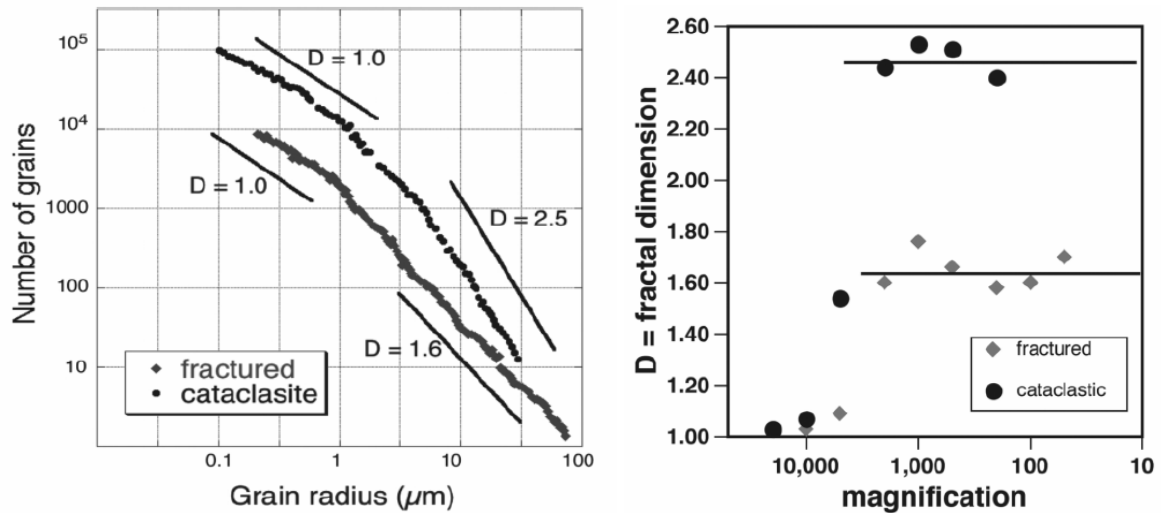


Figure 21 : a) Distribution de taille de grains de deux échantillons provenant de la faille de Nojima (Japon). L'un provient d'une zone de fracturation, l'autre d'une zone de cataclasite, b) Dimension fractale caractéristique de la distribution de taille de grain pour les deux échantillons..

2.2. Invariance et changement d'échelle, dans la déformation des objets géologiques.

Collaborations : J.R. Grasso (LGIT, Grenoble), F. Lahaie (Laego-Ineris, Nancy), G. Senfaute (Laego-Ineris, Nancy), J. Schmittbuhl (IPG, Strasbourg), D. Marsan (LGIT, Chambéry), C. Sue (Université Neuchâtel),

Ref. : 1.4, 1.5, 1.7, 5.1, 6.7, 6.8, 6.13, 6.14

Il s'agit d'étudier les processus de déformation et de fracturation des objets géophysiques à différentes échelles (éprouvette de laboratoire, massif rocheux, croûte terrestre). On s'intéresse aux indicateurs d'invariance d'échelle observables sur différents aspects de la déformation des objets (sismicité, champ de déformation, fracturation). On cherche, en particulier, à identifier les facteurs favorisant ou limitant l'invariance d'échelle, qui rendent possible ou impossible la transposition des observations à ces différentes échelles. L'objectif principal de ces travaux est la recherche de précurseurs de la rupture à grande échelle (coups de terrain, séismes majeurs, éboulements) à partir d'études à plus petite échelle (essais de laboratoire, petite échelle in-situ).

Cette approche multi-échelle est mise en œuvre dans le projet ACI « La prise en compte des hétérogénéités spatio-temporelles dans la modélisation de l'aléa sismique - application à la faille Nord-Anatolienne » (coordinateurs : J. Schmittbuhl, D. Marsan, M. Bouchon) dans lequel on étudie les hétérogénéités de propriétés à l'échelle de l'échantillon de laboratoire et à celle de la faille (élasticité, endommagement, gouge au voisinage de la faille, rugosité).

Nous avons également réalisé une l'analyse des propriétés statistiques de la sismicité de deux zones de sismicité des Alpes (arc piémontais et arc briançonnais, Sue et al. 2002). Elle montre des différences significatives, en particulier, pour la distribution des magnitudes des séismes. Le recours à un modèle numérique a permis de simuler des propriétés statistiques différentes pour ces deux zones et de proposer que ces différences soient liées à des différences de comportement mécanique et/ou à la profondeur (comportement plus ou moins ductile ou fragile des zones sismiques).

D'autre part, nous analysons la sismicité induite dans une mine de charbon. Nous comparons différents régimes d'activité sismique correspondant à différentes configurations d'exploitation. Celles-ci engendrent des perturbations différentes du champ de contrainte naturel, qui ont été par ailleurs simulées numériquement (collaboration avec l'Ineris). L'objectif à plus long terme est de mieux comprendre les relations entre le champ de contrainte et l'activité sismique en terme de propriétés statistiques, ce qui reste une question ouverte dans le domaine de la sismologie crustale.

3. Rôle des fluides dans la déformation des roches

Ce thème recouvre plusieurs aspects que j'ai abordés récemment sur le rôle des fluides dans le comportement mécanique des roches. Une première approche a été menée dans le cadre d'expérimentations d'écoute sismique haute fréquence pendant la sollicitation hydraulique d'un massif rocheux fracturé (Coaraze). Ceci nous a conduit à développer un modèle en 2D d'interaction fluide/roche, basé sur la méthode des éléments frontière. Un passage en 3D de ce modèle est en cours de réalisation. Un second aspect concerne la caractérisation statistique de l'écoulement dans une fracture où l'on cherche à déterminer les relations entre la structure du milieu et celle de l'écoulement. Enfin, un troisième aspect porte sur l'effet de l'eau sur le comportement mécanique du matériau rocheux, en particulier à long terme, basé sur des expériences de laboratoire et in situ. L'ensemble des développements de recherche que j'envisage sur ces différents aspects est développé dans la section 3.4.

3.1. Sismicité induite, couplage hydromécanique, interaction fluide/roche dans un massif rocheux fracturé

Le travail présenté ici s'appuie sur des expériences in situ réalisées, d'une part, sur le site de Coaraze, massif calcaire fracturé de surface sollicité hydrauliquement, et, d'autre part, sur le site de Tressange où deux piliers d'une mine de fer ont été ennoyés. Ces travaux ont permis de mettre en évidence une sismicité induite par l'action des fluides et d'élaborer un modèle numérique expliquant certaines observations.

3.1.1. Sismicité induite et couplage hydromécanique sur le site de Coaraze (Alpes Maritimes)

Collaborations : G. Senfaute (LAEGO-Ineris Nancy), C. Scavia , M. Castelli (Politecnico Turin), Y. Guglielmi (Geosciences azur).

1 thèse en co-tutelle avec le Politecnico de Turin (Valeria Saetta, 2004).

Ref. : 1.9, 3.1, 3.4, 6.6, 6.10

Le site de Coaraze (Figure 22a) est situé dans les Alpes Maritimes dans le massif de la Rocciaserra. Il s'agit d'un massif calcaire fracturé de dimension décamétrique ($20 \cdot 10^3 \text{ m}^3$) subissant une mise en charge hydraulique contrôlable. Le site est drainé par une source naturelle qui a été équipée d'une vanne. Une fois la vanne fermée, du fait des conditions limites hydrauliques (naturelles et artificielles), le niveau de l'eau s'élève d'environ 10 m dans le massif conduisant à la mise en charge hydraulique du massif. Une instrumentation fine permet de suivre la pression d'eau et la déformation en plusieurs points du massif. Les études précédentes ont montré des corrélations entre la variation de charge hydraulique et la déformation du massif (fractures et blocs rocheux).

Les expériences menées au cours de cette recherche ont consisté à réaliser une écoute sismique haute fréquence (0.1-1 kHz et 20-100 kHz) pendant une mise en charge hydraulique du massif : augmentation de la charge provoquée par la fermeture de la vanne d'exutoire. Ces mesures sismiques, couplées aux nombreuses mesures de pression et de déformation existantes sur le site, ont permis de mettre en évidence une sismicité induite par la mise en charge hydraulique et liée à la percolation de l'eau dans des fractures de faible perméabilité. La Figure 22b présente des résultats caractéristiques d'une expérience type.

Pour ce qui concerne l'activité sismique, on observe que la mise en charge hydraulique des drains est asismique, c'est à dire qu'aucune activité sismique n'est enregistrée lors de la mise en charge des drains (pressions P3, P4 et P5). L'activité sismique n'est décelable que lorsque la pression augmente dans les fractures de faible perméabilité (capteur P2). Ces

résultats montrent des corrélations entre l'énergie des signaux sismiques et la variation de la pression interstitielle dans les fractures les moins perméables. Plusieurs mécanismes générateurs de sismicité peuvent être proposés : rupture de ponts de calcite dans les fractures, ouverture instable de fractures, cisaillement de fractures.

Une modélisation numérique, basée sur la méthode des éléments frontières (ref. 3.1, 6.6) a été réalisée en collaboration avec le politecnico de Turin (Figure 23a). Elle permet de vérifier que de tels mécanismes sont compatibles avec les variations de pression de fluide (de l'ordre du bar) mesurées à l'intérieur des fractures. En particulier, on observe des phases d'instabilité dans le processus d'ouverture des aires de contact, qui sont susceptibles d'induire de la sismicité (Figure 23b).

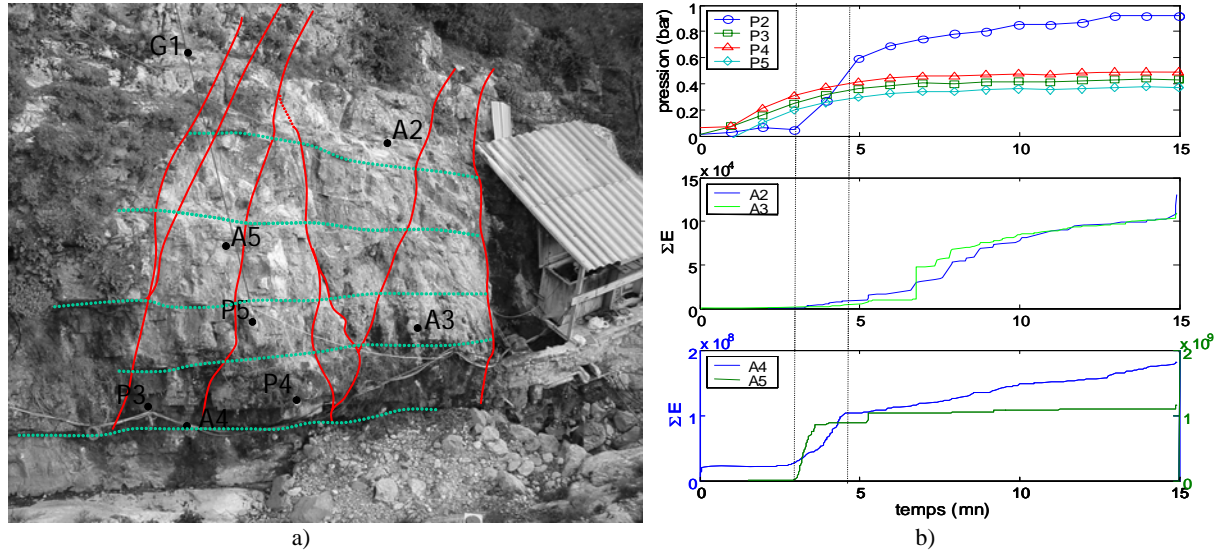


Figure 22 : a) Configuration du réseau sismique sur le site de Coaraze. G1 est un géophone tridirectionnel. A2, A3, A4, A5 sont des accéléromètres unidirectionnels. b) Pression hydraulique et énergie sismique cumulée sur les différents capteurs. P2 mesure la pression dans une fissure peu perméable, P3, P4 et P5 mesurent la pression dans des fractures fortement perméables (drains). Les accéléromètres A2 et A3 sont placés à distance des drains (1-1.5 m), A4 et A5 sont placés à proximité des drains (0.5 m).

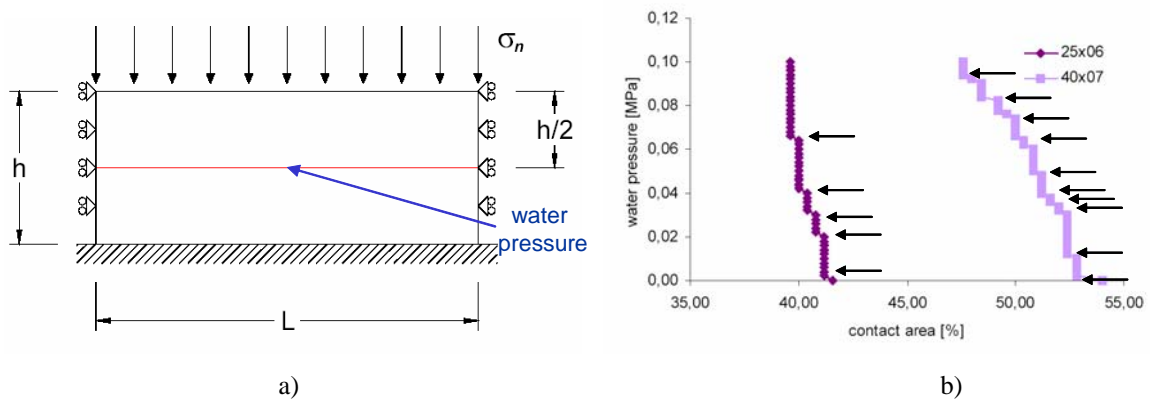


Figure 23 : a) Modélisation numérique par la méthode des éléments frontières de l'ouverture d'une fracture rugueuse sous l'effet d'une augmentation de pression de fluide. b) Proportion des aires de contact de la fracture en fonction de la pression de fluide, pour deux profils de rugosité différents. Les flèches horizontales indiquent les phases d'instabilité de l'ouverture, susceptibles d'induire de la sismicité.

3.1.2. Sismicité induite par l'ennoyage de piliers de mine

Collaborations : G. Senfaute (LAEGO-Ineris Nancy), F. Homand, D. Grgic (LAEGO-INPL Nancy)

1 thèse en cours : J. Wassermann.

Ref. : 4.1

Dans le contexte de l'abandon des exploitations de mine de fer de Lorraine, la question de la durabilité des piliers de mines a une pris une importance de premier ordre, en particulier après les effondrements qui ont causé des dégâts considérables en surface, au début des années 1990. L'abandon des l'exploitations pouvant s'accompagner de l'arrêt des pompages d'exhaure, le groupement de recherche GISOS s'est particulièrement intéressé à l'impact d'un éventuel ennoyage sur le comportement des piliers.

Le site expérimental de Tressange a permis de réaliser, pendant dix huit mois, l'ennoyage de deux piliers d'une zone d'exploitation minière en *chambres et piliers* par la réalisation d'une barrière étanche de grande dimension (Figure 4). Cette expérience in situ hors norme a été associée à un système d'instrumentation multidisciplinaire, mécanique, hydrogéologique et géophysique, dont un réseau d'écoute microsismique.

Au cours de l'ennoyage, une expérience de chute de bloc provoquée par enfoncement d'une tige métallique dans un forage situé au dessus de la zone expérimentale a été réalisée (voir section 1.1). Celle-ci a permis de caractériser les enregistrements sismiques liés à une chute de bloc. Par comparaison avec les données enregistrées pendant l'ensemble de l'ennoyage, il a été possible d'identifier les événements liés à des chutes de blocs et ceux dont l'origine est la sollicitation hydromécanique des piliers. Une classification des événements a été réalisée en se basant sur l'énergie et le contenu fréquentiel des signaux (Figure 25). Elle a permis de déterminer l'existence de différents mécanismes à l'origine de la sismicité induite.

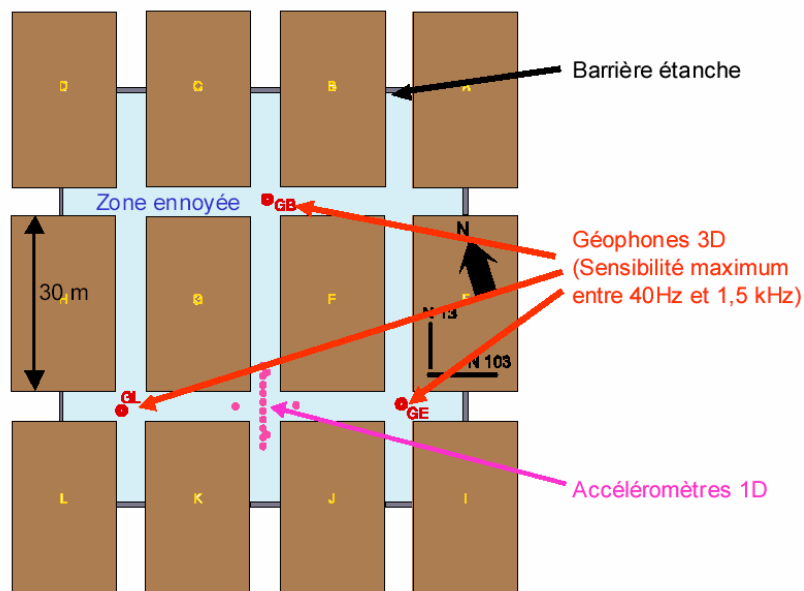


Figure 24 : Schéma du dispositif d'écoute microsismique de l'expérience d'ennoyage de deux piliers de mines dans le site pilote de Tressange. La figure montre la zone de pilier en coupe dans un plan horizontal.

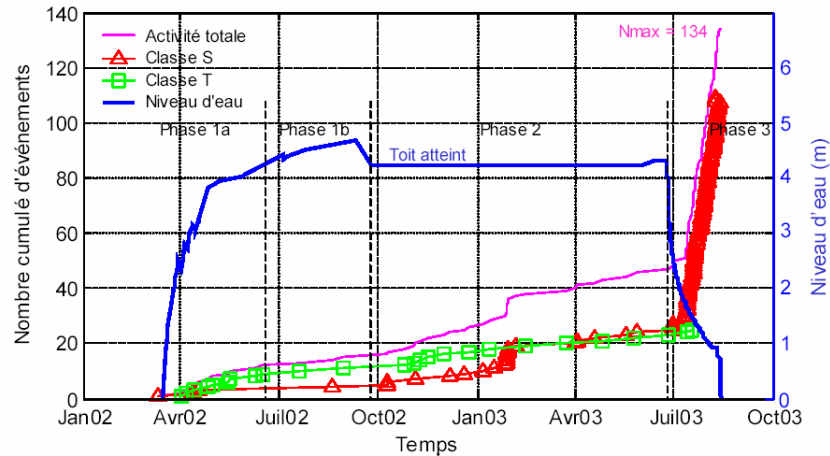


Figure 25 : Activité acoustique observée pendant l'expérience d'ennoyage de deux piliers sur le site expérimental de Tressange.

Cette recherche s'appuie également sur des essais de fluage réalisés sur des échantillons de minerai de fer, associant mesure de déformation et écoute acoustique. On étudie en particulier l'impact d'un changement brutal de teneur en eau, simulant un ennoyage, sur la vitesse de fluage et l'activité acoustique (voir section 3.3.2).

3.2. Structure d'un écoulement fluide dans une fracture rocheuse

Collaboration : Mostafa Fourar (LEMTA, Nancy)

Cette recherche, débutée récemment, porte sur la description statistique de la structure des écoulements dans une fracture rugueuse. L'objectif est d'étudier les relations entre la structure du milieu et celle de l'écoulement en utilisant les outils fournis par la géostatistique. En particulier, nous cherchons à déterminer des longueurs de corrélation caractéristiques qui permettent de définir une échelle au delà de laquelle l'écoulement peut être considéré comme homogène. Ceci permettra de définir les conditions à respecter pour une approche de type milieu continu équivalent pour décrire les écoulements dans un milieu fracturé.

La Figure 26 montre les résultats d'une simulation numérique d'un écoulement de type Darcy dans un milieu poreux bi-dimensionnel qui représente une fracture. Le champ de perméabilité est obtenu par tirage aléatoire dans une loi lognormal en imposant une certaine corrélation spatiale. La Figure 26a présente la carte de perméabilité simulée. La Figure 26c montre le corrélogramme (corrélation entre la valeur mesurée en un point p et un point distant d'une distance λ) du champ de perméabilité selon les directions x et y . Le calcul de l'écoulement est fait en différences finies, en imposant un gradient de pression entre les deux limites latérales du champ et un flux nul selon la direction x sur les limites inférieures et supérieures. Les Figure 26 b et d montrent le champ de vitesse d'écoulement et son corrélogramme selon les directions x et y . Sur ce dernier, on peut observer une anisotropie importante dans la corrélation spatiale des vitesses, avec une portée beaucoup plus grande selon la direction de l'écoulement (y). Selon la direction perpendiculaire (x), la valeur minimale du corrélogramme indique la largeur moyenne de chenalisation de l'écoulement. On voit, en outre, que l'écoulement possède une structure spatiale qui n'est pas identique à celle du milieu. L'imposition d'une direction d'écoulement fait apparaître des corrélations à longue portée dans le sens de l'écoulement et à courte portée dans la direction perpendiculaire. Ainsi, le mode d'homogénéisation de l'écoulement doit prendre en compte son anisotropie.

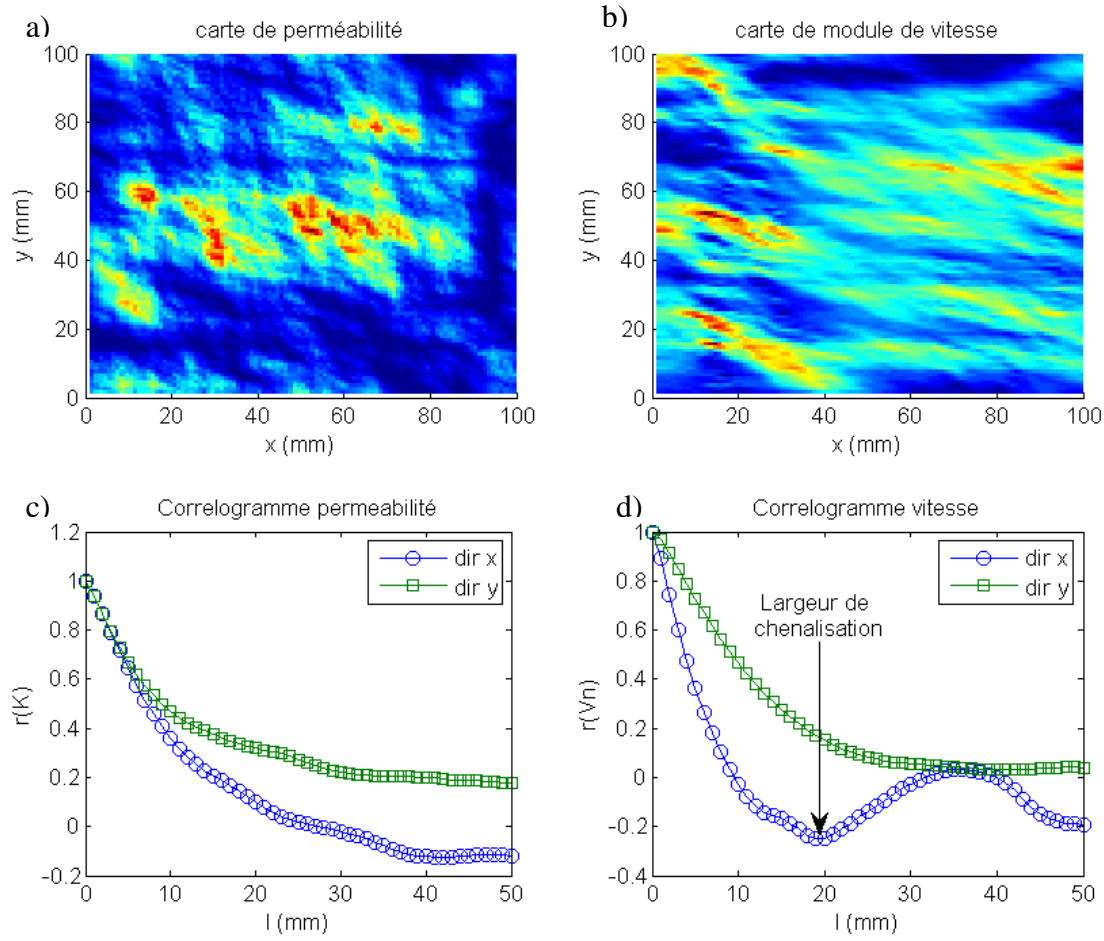


Figure 26 : a) Champ de perméabilité équivalente d'une fracture rocheuse, b) Champ de vitesse issu d'un calcul numérique d'écoulement de Darcy, c) Correlogramme de la perméabilité dans la direction x et y, d) correlogramme de la vitesse d'écoulement dans la direction x et y. La valeur minimale du correlogramme dans la direction x donne la largeur de chenalisation de l'écoulement.

Cette approche permettra également de fournir une perméabilité macroscopique équivalent en fonction de la corrélation du milieu et de l'échelle considérée. Cette caractéristique pourra alors servir de donnée d'entrée pour le calcul d'écoulements à grande échelle en particulier dans le cas des instabilités gravitaires.

3.3. Comportement hydromécanique et endommagement des roches partiellement saturées

Cette partie de ma recherche s'intéresse aux couplages hydromécaniques dans les roches poreuses. En particulier nous cherchons à identifier quels sont les modifications de propriétés mécaniques et physiques (résistance, rigidité, endommagement) induites par des changements du taux de saturation en eau. Ce problème est particulièrement crucial pour les ouvrages souterrains pour lesquels le creusement induit systématiquement des modifications de l'état hydrique. Dans le cas des mines en cessation d'exploitation la question de l'impact de l'ennoyage (arrêt des pompes d'exhaure qui conduit à la remontée de la nappe qui noie les galeries) sur la résistance à long terme des piliers est de première importance. En effet l'effondrement de piliers au fond peut avoir des conséquences très importantes en surface et faire courir des risques importants pour la population. Je présente ci-après, d'une part, la recherche que nous menons sur les argilites de Meuse - Haute Marne dans le cadre du laboratoire souterrain de l'ANDRA qui vise à étudier les capacités de confinement de ce matériau pour le stockage de déchets radio-actifs. D'autre part, je présente le travail réalisé sur le minerai de fer, pour lequel nous étudions l'effet d'un ennoyage sur le comportement en fluage de ce matériau.

3.3.1. Comportement d'une galerie dans les Argilites de Meuse Haute Marne

Collaborations : J.P. Henry (CEREGE, Nîmes), F. Homand, D. Grgic, R. Giot (LAEGO Nancy), D. Nguyen-Minh (LMS, polytechnique, Palaiseau)

Ref. : 6.1

Cette recherche se déroule dans le cadre du projet Forpro « GéomécaFor » proposé et coordonné initialement par J.P. Henry. Suite à un congé de longue maladie de J.P. Henry, le comité scientifique de Forpro m'a demandé d'assurer la co-direction de ce projet avec Françoise Homand.

La capacité d'une couche géologique à satisfaire les spécifications de confinement d'un site de stockage de déchets radioactifs dépend très fortement de l'endommagement induit par la réalisation d'une excavation (EDZ, Excavation Damaged Zone). L'endommagement conditionnant les propriétés hydrauliques de la roche encaissante, l'EDZ, selon son extension spatiale et l'intensité de l'endommagement, est susceptible de réduire les capacités de stockage de la galerie et de confinement des radionucléides. Dans le cas d'une formation argileuse, l'extension et l'intensité de la zone endommagée sont liées à la fois aux perturbations mécaniques et hydrauliques (contraste d'hygrométrie entre la galerie et le milieu naturel) en particulier lorsque le matériau est dans des conditions partiellement saturées. Le creusement d'une excavation induit une concentration de contrainte pouvant conduire le matériau à dépasser un seuil d'endommagement instantané (comportement non dépendant du temps) ou différé dans le temps (comportement dépendant du temps lié, par exemple, à la fissuration sous-critique). Les perturbations hydrauliques induites par le creusement sont également la cause d'un endommagement par couplage hydromécanique dans le domaine partiellement saturé. Les échelles de temps de la réponse à ces perturbations sont directement liées à la perméabilité du matériau. Dans le cas de l'argilite, celle-ci est très faible ce qui induit des temps de réponses très longs.

Le processus d'endommagement, induit par l'initiation et la propagation de microfissures, provoque l'émission d'ondes élastiques (émission acoustique). Ceci peut être suivi en temps réel par un système de monitoring microsismique. Le cumul de fissuration induit également un changement dans les propriétés élastiques du matériau et donc dans la vitesse de propagations des ondes acoustiques. Elles peuvent être estimées respectivement soit par

chargement mécanique soit par émission/réception d'ondes acoustiques (temps de parcours d'une impulsion élastique, atténuation, filtrage fréquentiel). En répétant ces mesures dans le temps, un tel dispositif permet de suivre l'évolution de la zone perturbée à la fois de manière instantanée (activité d'émission acoustique) et cumulée (mesure de vitesse des ondes).

Dans le cadre du groupement de recherche FORPRO, une expérimentation in situ a été conçue afin de permettre le suivi à long terme de la réponse du massif rocheux à une perturbation hydromécanique induite par un changement d'hygrométrie dans un ouvrage représenté par un forage (Figure 27). Cette expérience sera mise en place courant 2005 au sein du laboratoire souterrain de Meuse-Haute Marne de l'ANDRA. Les premières données devraient être disponibles dès la fin 2005.

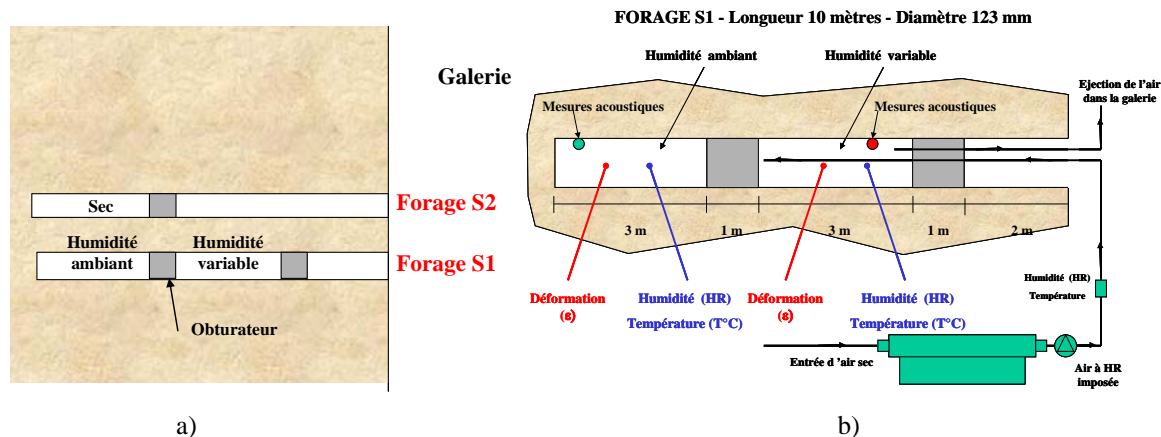


Figure 27 : a) Principe de l'expérience GeomécaFor. Deux forages à hygrométrie contrôlée sont instrumentés afin de suivre les déformations, l'activité acoustique et la variation de vitesses des ondes à long terme. b) Instrumentation d'un forage à hygrométrie contrôlée.

Parallèlement à cette expérimentation in situ, des essais en laboratoire sont réalisés sur des échantillons prélevés dans le même horizon que celui où sera implanté le laboratoire souterrain. Des d'essais de fluage (Figure 28) sont en cours afin d'appréhender le comportement de l'argilite sous conditions mécaniques et hydrauliques variables et bien contrôlées. Les essais sont réalisés à différents paliers de contrainte successifs de valeur croissante et à des valeurs d'hygrométrie différentes (imposé par la technique des solutions salines).

Ces expériences, menées à la fois en laboratoire et in situ, sont basées sur une association des mesures de déformations, d'écoute de l'émission acoustique, et de mesure d'émission/réception d'ondes acoustiques. L'expérimentation in situ se déroulera sur une période de deux ans à partir de l'automne 2005. Les essais de laboratoire ont débuté en décembre 2004. Cette recherche s'appuie également sur des simulations numériques rendant compte du couplage hydromécanique en milieu poreux partiellement saturé développé au Laego depuis plusieurs années [Giraud, 2001].



Figure 28 : a) Essais de fluage à contrainte constante (paliers successifs croissants). Chaque éprouvette (au total au nombre de 5) est soumise à une contrainte constante identique et à une hygrométrie différente. Chacune est équipée de deux capteurs d'émission acoustique permettant de suivre l'activité acoustique et de mesurer la vitesse des ondes.

Bien que focalisée sur l'argilite de Meuse - Haute Marne, en relation avec le stockage des déchets radioactifs, cette recherche peut avoir des implications pertinentes pour l'étude de l'effet de l'eau sur les versants rocheux. En effet, ces derniers sont soumis à des variations de niveau piezométrique qui impliquent qu'une partie conséquente du matériau rocheux soit dans la zone partiellement saturée. Il peut ainsi subir des variations de degré de saturation importantes. Ceci peut engendrer des changements importants dans le comportement du matériau (modification de résistance, de déformabilité, de viscosité). Ce type de phénomène n'est pas limité aux roches argileuses mais est observable sur d'autres roches, certaines étudiées au sein du Laego comme le minerai de fer [Grgic *et al.*, 2005], le gypse [Auvray *et al.*, 2004], et plus généralement sur les roches dont l'espace poreux peut connaître des variations de degré de saturation comme, par exemple, les granites microfissurés ou les calcaires [par exemple Swanson, 1984; Ballivy *et al.*, 1992].

3.3.2. Impact de la saturation sur le comportement en fluage du minerai de fer

Collaborations : D. Grgic, F. Homand (LAEGO Nancy)

Cette recherche est orientée vers les problèmes d'effondrements miniers, liés à l'abandon des mines de fer de Lorraine. On cherche à déterminer l'effet des variations de saturation en eau sur le comportement à long terme du matériau constituant les piliers des galeries abandonnées. En particulier on s'intéresse à l'effet de l'ennoyage lié à l'arrêt des pompes d'exhaure.

Pour simuler cet ennoyage nous avons réalisé des essais de fluage sur des échantillons de minerai de fer. Avant chargement, ces échantillons ont été amenés à l'équilibre hydrique avec une atmosphère dont l'hygrométrie relative est de 90% ce qui correspond aux conditions mesurées in situ. Le chargement mécanique consiste à appliquer des paliers de contrainte successifs avec une valeur croissante. Chaque palier est maintenu jusqu'à atteindre une vitesse de déformation stable. Après avoir atteint la contrainte correspondant à celle calculée au cœur de piliers types, on réalise une saturation complète de l'échantillon (ennoyage). La contrainte est maintenue constante jusqu'à stabilisation de la vitesse de déformations puis est augmentée une dernière fois. Ce dernier palier est maintenu jusqu'à la rupture de l'échantillon. La Figure 29 montre les résultats du premier essai de ce type que nous avons réalisé. On observe d'abord classiquement l'effet des paliers de contrainte sur les déformations caractérisé par une

phase de déformation instantanée suivie par une phase de diminution des vitesses de déformation. Le même comportement s'observe pour le cumul d'événement acoustique.

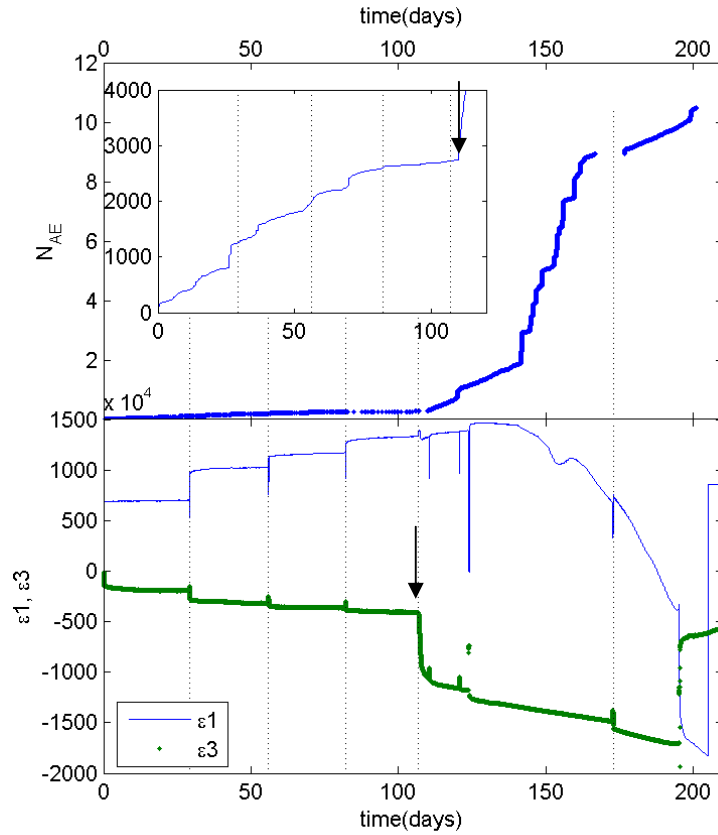


Figure 29 : Essais de fluage avec paliers de contrainte successifs croissants. Les traits pointillés délimitent les paliers de contrainte. La flèche indique l'ennoyage de l'échantillon. Le nombre d'événement d'émission acoustique N_{EA} , et les déformations axiale, ε_1 et transversale, ε_3 sont représentés en fonction du temps (les valeurs positives correspondent à une contraction).

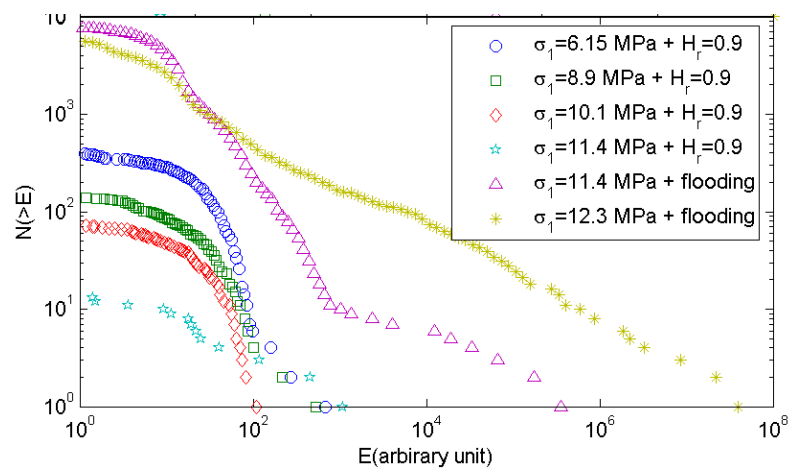


Figure 30 : Distribution d'énergie des émissions acoustiques pour les différentes phases de l'essai de fluage.

La saturation complète de l'échantillon donne lieu à une augmentation très importante de la déformation transversale qui indique une amplification de la dilatance. On observe également un allongement axial relatif de l'échantillon. Ceci peut s'expliquer par la saturation

complète du matériau qui libère la tension capillaire et, par conséquent, la contraction de l'échantillon. Ceci s'accompagne d'une forte augmentation de l'activité acoustique. L'ennoyage a également un effet remarquable sur la distribution d'énergie des événements acoustiques (Figure 30). Cette distribution est d'abord en loi exponentielle avec une taille moyenne augmentant légèrement avec la contrainte. Après ennoyage, elle suit une loi puissance sur plusieurs ordres de grandeurs (jusqu'à 7 ordres de grandeurs en fin d'essai). On observe également une nette augmentation de l'énergie maximale de plusieurs ordres de grandeurs.

Ces résultats montrent que le fait de passer d'une saturation partielle, même élevée, à une saturation complète engendre des modifications considérables du comportement mécanique en fluage. Ceci peut avoir des implications importantes pour les ouvrages soumis à des variations d'hygrométrie, tels que les galeries souterraines mais aussi pour les massifs rocheux ou les failles à faible profondeur soumis de ce fait à des variations de hauteur de nappes et donc de saturation partielle.

3.4. Projet de développement sur le thème Interaction et couplage fluide/roche

Collaborations : Y. Guglielmi, (Geoscience-Azur), C. Scavia (Politecnico Turin), J. Schmittbuhl (IPG Strasbourg), M. Fourar (Lemta, Nancy)

La recherche que j'ai menée jusqu'ici sur l'endommagement et la rupture des roches m'a conduit naturellement à m'intéresser à la prise en compte de l'effet des fluides dans le comportement des roches. Cet effet est particulièrement important dans le cas des versants instables qui sont soumis à de fortes variations hydriques du fait de leur proximité avec la surface et pour lesquels le rôle déterminant des fluides dans leurs modes de déformation (stabilité/instabilité, vitesse de déformation) est un aspect notoirement incontournable.

J'ai ainsi commencé à développer une approche micro-mécanique du couplage fluide roche. Un premier travail a été réalisé au cours de la thèse de Valeria Saetta (2004), au cours de laquelle nous avons développé un modèle micro-mécanique 2D d'interaction fluide-roche (sans écoulement), basé sur un code aux éléments frontières développé au politecnico de Turin [Scavia, 1995; Allodi *et al.*, 2005]. Ce modèle a permis d'expliquer la sismicité observée sur le site de Coaraze par l'ouverture instable d'aires de contact induite par l'augmentation de la pression de fluide dans l'espace poreux [Saetta, 2004]. Afin de permettre la prise en compte d'un écoulement, un modèle équivalent mais en 3D est en cours de développement en collaboration avec Jean Schmittbuhl (IPG Strasbourg) et Mostafa Fourar (LEMNTA Nancy). Il s'agit d'associer deux approches numériques pour traiter distinctement la partie solide et la partie fluide du problème. L'une développée avec le politecnico de Turin [Allodi *et al.*, 2005] consiste à appliquer une pression fluide sur la partie de la fracture en dehors des aires de contact, et à calculer l'état de contrainte sur les aires en contact en tenant compte de la contribution du fluide et du champ de contrainte extérieur. Ce calcul recourt à la méthode des éléments frontières traitée en discontinuité de déplacement. Pour des raisons de choix de méthode de résolution numérique, ce modèle peut difficilement être passé en 3D. De ce fait, le passage en 3D, nécessaire pour permettre un calcul d'écoulement réaliste, se fera en se basant sur un modèle numérique, lui aussi basé sur les éléments frontières [Batrouni *et al.*, 2002], permettant le calcul de la contrainte sur les aires de contact dans une fracture rugueuse en 3D. Ce modèle sera adapté pour prendre en compte l'effet d'une pression de fluide sur la partie ouverte de la fracture. L'espace poreux délimité par les deux épontes de la fracture servira de donnée d'entrée pour un deuxième type de calcul concernant l'écoulement. Il s'agira d'un calcul, soit de type Darcy, en considérant une perméabilité locale dépendante de l'ouverture [Meheust and Schmittbuhl, 2001; Meheust and Schmittbuhl, 2003], soit de type Navier-Stokes en considérant la géométrie réelle de l'espace poreux [Fourar, 2003].

Les résultats du calcul d'écoulement, c.a.d. le champ de pression dans l'espace poreux, sont ensuite utilisés comme donnée d'entrée du calcul mécanique d'état de contrainte des aires de contact. Ce calcul donne en sortie la modification de l'espace poreux induit par la pression de fluide. Ce rebouclage entre le calcul d'écoulement et le calcul d'état de contrainte permettra ainsi de rendre compte de l'interaction hydromécanique, même s'il ne s'agit pas d'un calcul couplé au sens strict. Cette approche numérique sera complétée par une démarche expérimentale en laboratoire, sur la base d'un dispositif développé à ENS Paris, puis à l'IPG Strasbourg, par Jean Schmittbuhl [Meheust and Schmittbuhl, 2000]. Ce dispositif permet d'observer l'écoulement dans une réplique de fracture naturelle de manière optique. Il est en cours de modification pour permettre l'application d'une contrainte normale sur l'échantillon et d'en observer les effets sur l'écoulement.

Les résultats numériques et expérimentaux issus de ce travail seront à même de fournir des données permettant une description statistique de la structure des écoulements dans une fracture rugueuse. Ceci permettra de définir les conditions à respecter pour autoriser une approche de type milieu continu équivalent pour décrire les écoulements dans un milieu fracturé, en particulier pour déterminer une perméabilité équivalente. On peut ainsi envisager une amélioration substantielle par rapport à la loi cubique, souvent mise en défaut à l'échelle macroscopique dans le cas des fractures rugueuses [Meheust and Schmittbuhl, 2001].

J'envisage également une approche macroscopique du couplage fluide roche, tournée particulièrement vers les versants instables, en collaboration avec Yves Guglielmi (Géosciences-Azur, Nice). Cette approche se base en partie sur le modèle de fluage développé précédemment [Amitrano and Helmstetter, 2005]. En effet, ce modèle permet de prendre explicitement en compte l'effet des fluides sur la déformation des roches, soit par le biais de la notion de contrainte effective (modification de l'état de contrainte) soit par la modification de l'énergie d'activation des fissures qui engendre une accélération de la fissuration sous-critique en présence de fluide [Swanson, 1984; Atkinson, 1991]. Ces effets physico-chimiques expliquent que la durée de vie avant rupture des roches est fortement réduite lorsque le matériau est saturé d'eau [Kranz et al., 1982; Masuda, 2001]. Ce modèle sera couplé à un modèle d'écoulement fluide de type Darcy en milieu perméable, en prenant en compte la relation entre l'endommagement, la perméabilité et le coefficient de Biot (terme de couplage hydromécanique). Nous envisageons de simuler ainsi l'évolution de l'endommagement d'un massif rocheux en prenant en compte l'effet du fluide sur la vitesse d'endommagement et, réciproquement, l'effet de l'endommagement sur l'écoulement fluide. Cette approche vient compléter une approche similaire mais en milieu pré-fracturé (sans évolution de la fracturation) en cours de développement à Géoscience-azur [Cappa et al., 2004]. Cette recherche pourra s'adosser à des mesures en laboratoire permettant de déterminer la relation entre endommagement, perméabilité, coefficient de Biot et traçage hydro-chimique, pendant la sollicitation mécanique de la roche. On pourra se baser sur les travaux réalisés dans la littérature [Ojala et al., 2003; Bruderer-Weng et al., 2004; Song et al., 2004] en associant l'ensemble de ces mesures dans une expérience de sollicitation mécanique (compression triaxiale). Le suivi hydrochimique en laboratoire est envisageable dans la mesure où l'endommagement correspond physiquement à une création de surface libre par propagation de fissures. La surface créée est ainsi très réactive et est susceptible de générer un signal hydrochimique mesurable [Ojala et al., 2003]. Des expériences préliminaires sont en cours de réalisation à Géoscience-azur (Thèse de S. Binet en cours) et montrent que cette approche est en mesure de fournir des explications physiques des signaux hydrochimiques observés sur les versants instables [Binet et al., 2004] et une mise en relation avec la déformation mécanique du matériau.

4. Synthèse et perspectives

L'objectif principal de la recherche présentée est d'améliorer la compréhension des mécanismes de déformations des objets géologiques, en particulier les processus qui mènent à la rupture. Je m'intéresse à des échelles très étendues (échantillon de laboratoire, massif rocheux, croûte terrestre). L'existence d'invariances d'échelle permet d'envisager une transposition de ces résultats à différentes échelles. Cette transposition n'est pas systématiquement possible. Par exemple, les précurseurs de la rupture observés en laboratoire n'ont toujours pas montré leur pertinence à l'échelle des massifs rocheux ou de la croûte terrestre. Il est donc nécessaire de rechercher les conditions dans lesquelles l'invariance d'échelle est vérifiée et les conditions limitantes.

Aux différentes échelles étudiées, je met en œuvre la démarche suivante : *observation expérimentale, modélisation des données, simulation numérique*.

Les observations sur lesquelles je travaille concernent principalement les structures d'endommagement (observations statiques) et la sismicité induite par la déformation (observation dynamique). La modélisation de ces données passe par l'utilisation d'outils issus du formalisme fractal et de la physique statistique. Enfin la modélisation numérique permet de mettre en évidence les conditions nécessaires à l'émergence des propriétés observées expérimentalement. Elle permet, en outre, de faire le passage d'une échelle à une autre. A titre d'exemple, cette approche a été menée complètement dans les publications Amitrano (2003) et Sue et al. (2002). Dans ces deux études, les données issues de l'observation (en laboratoire ou in-situ) ont été modélisées statistiquement puis simulées numériquement. Cela a permis de proposer des explications (conditions de sollicitation mécanique et/ou propriétés des matériaux) aux observations expérimentales in situ. Cette démarche a été également suivie dans la thèse de Valeria Saetta [Saetta, 2004] concernant la sismicité induite dans un massif fracturé chargé hydrauliquement.

Ces résultats me conduisent à envisager des perspectives de recherche selon deux axes principaux :

- poursuivre l'approche multi-échelle sur d'autres objets tel que les instabilités gravitaires.
- Intégrer le rôle des fluides dans la déformation des roches.

Concernant le premier point, en particulier dans le cas des versants instables, mon travail s'est limité, pour l'instant, à l'acquisition ou la modélisation des données. La part de modélisation numérique et de transposition d'échelle reste à faire. Dans le cas des séismes de la croûte terrestre, la diversité des conditions géologiques et mécaniques permet d'envisager cette approche sur de nombreuses zones sismiques différentes. A titre d'exemple, un travail est en cours dans le cadre de l'ACI « La prise en compte des hétérogénéités spatio-temporelles dans la modélisation de l'aléas sismique - application à la faille Nord-Anatolienne » dans lequel on met en œuvre une approche comparable.

Concernant le deuxième point, sur l'ensemble des objets étudiés, il apparaît important d'intégrer le rôle des fluides et de leurs interactions avec le matériau rocheux, que ce soit par leur effet sur l'état de contrainte (notion de contrainte effective) ou sur le comportement mécanique du matériau (principalement changement de propriétés de résistance et de déformabilité). Ceci est particulièrement vrai dans le cas des instabilités gravitaires, pour lesquels les variations hydriques et hydrauliques constituent un facteur de premier ordre influençant les modes et les vitesses de déformation. Pour prendre en compte ces effets, j'envisage deux approches complémentaires l'une de l'autre et à deux échelles différentes :

- écoulement et interaction fluide/roche dans les fractures : impact des pressions de fluide et de l'état de contrainte sur l'espace poreux de la fracture par une étude numérique et expérimentale. Recherche des conditions d'homogénéisation de ce couplage.
- Impact des fluides sur le comportement mécanique des roches : relations entre l'endommagement, la perméabilité et le coefficient de Biot (couplage hydromécanique). Intégration dans un modèle numérique d'endommagement à long terme et appuis sur des expériences de laboratoire pour la détermination empirique de ces relations.

Dans la perspective d'une application de ces deux approches aux instabilités gravitaires, on peut également envisager une comparaison avec des données obtenues in situ (niveau piezométrique, bilan de débit entrant sortant, traçage hydro-chimique).

5. Références Bibliographiques

- Allodi, A., M. Castelli, D. Amitrano, and Y. Guglielmi, A BEM model for the study of the hydromechanical behaviour of rock fracture and fracture and associated seismicity, in *11th International Conference of the International Association of Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Torino, 2005.
- Amitrano, D., Emission acoustique des roches et endommagement: Approches experimentale et numerique, Application a la sismicite miniere, PhD Thesis thesis, Universite Joseph Fourier, Grenoble, 1999.
- Amitrano, D., Brittle-ductile transition and associated seismicity: Experimental and numerical studies and relationship with the b-value, *J. Geophys. Res.*, *108* (B1), 2044, doi:10.1029/2001JB000680, 2003.
- Amitrano, D., Emerging complexity in a simple model of the mechanical behavior of rocks, *CR Geosciences*, *336* (6), 505-512 (doi:10.1016/j.crte.2003.11.023), 2004.
- Amitrano, D., J.-R. Grasso, and D. Hantz, From diffuse to localized damage through elastic interaction, *Geophysical Research Letters*, *26* (14), 2109-2112, 1999.
- Amitrano, D., J.R. Grasso, and G. Senfaute, Seismic precursory patterns before a cliff collapse and critical-point phenomena, *Geophys. Res. Let.*, *32* (8), L08314, doi:10.1029/2004GL022270, 2005.
- Amitrano, D., and A. Helmstetter, Brittle creep, damage and time to failure in rocks, *soumis à J. Geophys. Res.*, 2005.
- Amitrano, D., and J. Schmittbuhl, Fracture roughness and gouge distribution of a granite shear band, *J. Geophys. Res.*, *107* (B12, 2375, doi:10.1029/2002JB001761), 16 p., 2002.
- Andrade, E.N., The viscous flow in metals, and Allied phenomena, *Proc. R. Soc. A*, *84*, 1-12, 1910.
- Atkinson, B.K., *Fracture mechanics of rock*, 534 pp., Academic press, 1991.
- Auvray, C., F. Homand, D. Hoxha, and C. Didier, Influence du temps et de l'hygrométrie sur le comportement du gypse, *Revue Française de Géotechnique*, *106-107*, 41-51, 2004.
- Bak, P., C. Tang, and Wiesenfeld, Self-organized criticality, *Physical Review A*, *38* (1), 364-374, 1988.
- Ballivy, G., M. Daoud, and K. Saleh, Comportement physico-mecanique des roches sous l'effet de l'humidite relative ambiante, in *Colloque Rene Houpert*, Nancy, 1992.
- Batrouti, G., A. Hansen, and J. Schmittbuhl, Elastic response of rough surfaces in partial contact, *Europhys. Lett.*, *60* (5), 724-730, 2002.
- Binet, S., Y. Guglielmi, J. Mudry, and C. Bertrand, Evolution à long terme des versants montagneux vers de grand mouvements de terrain : interaction entre l'hydrogéologie et la déformation, in *RST*, Strasbourg, 2004.
- Biot, M.A., General theory of three-dimensional consolidation, *J. Appl. Phys.*, *12*, 155-164, 1941.
- Boullier, A.M., K. Fujimoto, H. Ito, T. Ohtani, D. Amitrano, O. Fabbri, N. Keulen, and P. Pezard, Stuctural evolution of the Nojima fault, Awaji Island, Japan, in *The Second International Symposium on Slip and Flow Processes in and below the Seismogenic Region*, pp. 6, Tokyo, 2004a.
- Boullier, A.M., K. Fujimoto, H. Ito, T. Ohtani, N. Keulen, O. Fabbri, D. Amitrano, M. Dubois, and P. Pezard, Structural evolution of the Nojima fault (Awaji Island, Japan) revisited from the GSJ drillhole at Hirabayashi, *Earth, Planets and Space*, *56*, 1233-1240, 2004b.
- Bruderer-Weng, C., P. Cowie, Y. Bernabe, and I. Main, Relating flow channelling to tracer dispersion in heterogeneous networks, *Advances in Water Resources*, *27*, 843-855, 2004.

- Burridge, R., and L. Knopoff, Model and theoretical seismicity, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 57, 341-371, 1967.
- Cappa, F., Y. Guglielmi, P. Fénart, V. Merrien-Soukatchoff, and A. Thoraval, Hydromechanical interactions inside a medium size shallow network of well connected discontinuities inferred from in situ simultaneous hydraulic and mechanical measurements, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, accepted, 2004.
- Fourar, Synthèse des travaux de recherche sur l'analyse et la modélisation des écoulements mono et diphasiques à forts débits en milieu poreux et en fracture., HDR thesis, Nancy, 2003.
- Gerstenberger, M., S. Wiemer, and D. Giardini, A systematic test of the hypothesis that b varies with depth in California, *Geophysical Research Letters*, 28 (1), 57-60, 2001.
- Giraud, A., Modélisation des couplages THM dans les milieux saturés et partiellement saturés, HDR thesis, Nancy, 2001.
- Grgic, D., R. Giot, F. Homand, and A. Giraud, Effect of suction on the mechanical behavior of iron ore rock, *International Journal of Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, in press, 2005.
- Guarino, A., A. Garcimartin, and S. Ciliberto, An Experimental Test of the Critical Behaviour of Fracture Precursors, *European Physical Journal B*, 6 (1), 13-24, 1998.
- Gutenberg, B., and C.F. Richter, *Seismicity of the earth and associated phenomena*, Princeton University Press, Princeton, 1954.
- Hergarten, S., and H.J. Neugebauer, Self-organized criticality in a landslide model, *Geophysical Research Letters*, 25 (6), 801-804, 1998.
- Hirata, T., Omori's power law aftershock sequences of microfracturing in rock fracture experiment, *Journal of Geophysical Research*, 92 (B7), 6215-6221, 1987.
- Hirata, T., T. Satoh, and K. Ito, Fractal structure of spacial distribution of microfracturing in rock, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 90, 369-374, 1987.
- Jaume, S.C., and L.R. Sykes, Evolving Towards a Critical Point: A Review of Accelerating Seismic Moment/Energy Release Prior to Large and Great Earthquakes, *Pageoph*, 155, 279-305, 1999.
- Kranz, R., W. Harris, and N. Carter, Static fatigue of Granite at 200°C, *Geophys. Res. Let.*, 9 (1), 1-4, 1982.
- Lockner, D.A., The role of acoustic emission in the study of rock fracture, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 30 (7), 883-899, 1993.
- Malet, J.-P., O. Maquaire, and E. Calais, The use of Global Positioning System for the continuous monitoring of landslides. Application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France), *Geomorphology*, 43, 33-54, 2002.
- Marone, C., and C.H. Scholz, Particle-size distributions and microstructures within simulated fault gouge, *Journal of Structural Geology*, 11 (7), 799-814, 1989.
- Masuda, K., Effects of water on rock strength in a brittle regime, *Journal of Structural Geology*, 23, 1653-1657, 2001.
- Meheust, Y., and J. Schmittbuhl, Flow enhancement of a rough fracture, *Geophys. Res. Let.*, 27 (18), 2989-2992, 2000.
- Meheust, Y., and J. Schmittbuhl, Geometrical heterogeneities and permeability anisotropy of rough fractures, *J. Geophys. Res.*, 106 (B2), 2089-2102, 2001.
- Meheust, Y., and J. Schmittbuhl, Scale effects related to flow in rough fractures, *Pageoph*, 160 (5-6), 1023-1050, 2003.
- Mekkawi, M., A. Hassoup, J.R. Grasso, and P.A. Schnegg, Fractal and spectral analysis of the earthquake sequences along the Aswan Lake, Egypt, in *26th General Assembly of the European Geophysical Society*, pp. abstract n°EGS02-A-00027, Nice, 2002.

- Mori, J., and R.E. Abercombie, Depth dependence of earthquake frequency-magnitude distributions in California: Implication for rupture initiation, *Journal of Geophysical Research*, 102 (B7), 15081-15090, 1997.
- Nechad, H., A. Helmstetter, R.E. Guerjouna, and D. Sornette, Andrade and Critical Time-to-Failure Laws in Fiber-Matrix Composites: Experiments and Model, *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, submit, 2004.
- Ojala, I., B.T. Ngwenya, I.G. Main, and S.C. Elphick, Correlation of microseismic and chemical properties of brittle deformation in Lochaberbriggs sandstone, *J. Geophys. Res.*, 108 (B5), 2268, doi:10.1029/2002JB002277, 2003.
- Omori, F., On the aftershocks of earthquakes, *J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo*, 7 (111-120), 1894.
- Saetta, V., Micro-seismicity and hydromechanics of fractured rock masses: experiments and numerical simulations, Phd thesis, INPL-Polytechnico, Nancy-Torino, 2004.
- Sammis, C.G., and R.L. Biegel, Fractals, Fault-Gouge, and Friction, *Pageoph*, 131 (1/2), 255-271, 1989.
- Scavia, C., A method for the study of crack propagation in rock structures, *Geotechnique*, 45 (3), 447-463, 1995.
- Schmittbuhl, J., S. Gentier, and S. Roux, Field measurements of the roughness of fault surfaces, *Geophysical Research Letters*, 20 (8), 639-641, 1993.
- Song, I., S.C. Elphick, I.G. Main, B.T. Ngwenya, N.W. Odling, and N.F. Smyth, One-dimensional fluid diffusion induced by constant-rate flow injection: theoretical analysis and application to the determination of fluid permeability and specific storage of a cored rock sample, *J. Geophys. Res.*, 109 (B05207, doi:10.1029/2002JB002395.), 2004.
- Stanley, H.E., *Introduction to phase transition and critical phenomena*, Oxford University Press, 1971.
- Sue, C., J.R. Grasso, F. Lahaie, and D. Amitrano, Mechanical behavior of western alpine structures inferred from statistical analysis of seismicity, *Geophysical Research Letters*, 29 (8, doi:10.1029/2001GL014050), 65-1 65-4, 2002.
- Swanson, P.L., Subcritical crack growth and other time- and environment-dependent behavior in crustal rocks, *J. Geophys. Res.*, 89 (B6), 4137-4152, 1984.
- Zapperi, S., P. Ray, H.E. Stanley, and A. Vespignani, First-order transition in the breakdown of disordered media, *Phys. Rev. Lett.*, 78, 1408-1411, 1997a.
- Zapperi, S., A. Vespignani, and E. Stanley, Plasticity and avalanche behaviour in microfracturing phenomena, *Nature*, 388 (14 august 1997), 658-660, 1997b.

Annexe 1 : Liste des Publications

1. Revues internationales avec comité de lecture : 8 articles

- 1.1. **Amitrano, D.**, and A. Helmstetter (2005), Brittle creep, damage and time to failure in rocks, soumis à *Journal of Geophysical Research*.
- 1.2. **Amitrano, D.**, Grasso, J.R. and Senfaute, G., 2005. Seismic precursory patterns before a cliff collapse and critical-point phenomena. *Geophys. Res. Let.*, Vol. 32, No 8, L08314, doi:10.1029/2004GL022270
- 1.3. Boullier A.M., K. Fujimoto, H. Ito, T. Ohtani, N. Keulen, O. Fabbri, **D. Amitrano**, M. Dubois, and P. Pezard, (2004) Structural evolution of the Nojima fault (Awaji Island, Japan) revisited from the GSJ drillhole at Hirabayashi, *Earth, Planets and Space*, 56, 1233-1240.
- 1.4. **Amitrano D.** (2004), Emerging complexity in a simple model of the mechanical behavior of rocks, *CR Geosciences*, 336 (6), 505-512 (doi:10.1016/j.crte.2003.11.023).
- 1.5. **Amitrano D.** (2003), Brittle-ductile transition and associated seismicity: Experimental and numerical studies and relationship with the b-value, *Journal of Geophysical Research*, 108 B1, 2044, doi:10.1029/2001JB000680, 15 p.
- 1.6. **Amitrano D.** and J. Schmittbuhl (2002), Fracture roughness and gouge distribution of a granite shear band, *Journal of Geophysical Research*, 107 B12, 2375, doi:10.1029/2002JB001761, 16 p.
- 1.7. Sue, C., J. R. Grasso, F. Lahaie and **D. Amitrano** (2002). Mechanical behavior of western alpine structures inferred from statistical analysis of seismicity. *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, No 8, p 65-1:65-4.
- 1.8. **Amitrano D.**, Grasso, J.R., Hantz, D. (1999). From diffuse to localised damage through elastic interaction, *Geophysical Research Letters*, Vol. 26, No 14, p 2109-2112.

Manuscrits en préparation : 2

- 1.9. Saetta, V., **D. Amitrano**, G. Senfaute, F. Cappa, and Y. Guglielmi, (2005). Low water pressure induced seismicity: Evidences from in-situ experiment. *en préparation*.
- 1.10. Wassermann, J., **D. Amitrano**, G. Senfaute, and F. Homand, (2005). Damage process, acoustic emission and wave velocity during Iron core loading tests. *en preparation*.

2. Revue Nationale avec comité de lecture : 1 article

- 2.1. Senfaute, G., **D. Amitrano**, F. Lehnard, and J. Morel (2004), Etude expérimentale en laboratoire de l'endommagement des roches de craie par méthodes acoustiques et corrélation avec des résultats in situ, *Revue Française de Géotechnique*, Vol. 110, 1-12.

3. Actes de congrès internationaux avec comité de lecture : 9 articles

- 3.1. Castelli, M., A. Allodi, and **D. Amitrano**, (2005). A BEM model for the study of the hydromechanical behaviour of rock fracture and fracture and associated seismicity, accepté à *11th International Conference of the International Association of Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Torino, juin 2005.
- 3.2. Boullier, A.M., K. Fujimoto, H. Ito, T. Ohtani, **D. Amitrano**, O. Fabbri, N. Keulen, and P. Pezard (2004), Stuctural evolution of the Nojima fault, Awaji Island, Japan, in *The Second International Symposium on Slip and Flow Processes in and below the Seismogenic Region*, 6 p, Tokyo.
- 3.3. Damaj, J., C. Balland, T. Verdel, **D. Amitrano**, and F. Homand, Auscultation et surveillance des perturbations hydromécaniques d'ouvrages souterrains par la mesure et l'analyse de la propagation d'ondes dans les roches, in *Proceedings of the International Conference on Geotechnical Engineering.*, pp. 791-798, Beyrouth, 2004
- 3.4. Saetta, V., **D. Amitrano**, G. Senfaute, and Y. Guglielmi (2003), Water percolation

- inducing micro-seismicity: evidences from small scale in-situ experiment, in *GTMM, GeoTechnical Measurment and Modelling*, pp. 351-356, Karlsruhe, Germany.
- 3.5. Wassermann, J., **D. Amitrano**, G. Senfaute, and F. Homand (2003), Damage evolution during uniaxial compressive tests evaluated by acoustic emission monitoring, in *GTMM, GeoTechnical Measurement and Modelling*, pp. 413-418, Karlsruhe, Germany.
 - 3.6. **Amitrano D.** (2002). Damage localisation and brittle-ductile transition. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, Paris, Presses de l'ENPC/LCPC, pp 87-92.
 - 3.7. **Amitrano D.**, D. Hantz, J.R. Grasso, (1999). Damage localisation and brittleness of rocks: experimental and numerical approach, *Proceedings of the Congress of International Society of Rock Mechanics*, Paris, Août 1999, pp. 837-842.
 - 3.8. **Amitrano D.**, and D. Hantz (1998). Acoustic emission of jointed and intact rock during triaxial compression test. *International Conference on Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, Vienna, Austria, Balkema (ed), 375-380.
 - 3.9. **Amitrano D.**, D. Hantz and Y. Orengo, (1996). Emission acoustique d'une roche fracturée. *11° Colloque Franco-Polonais en Mécanique des Roches Appliquée*, Université Technique de Gdansk (ed), Gdansk, 84-91.

4. Actes de congrès nationaux avec comité de lecture : 3 articles

- 4.1. Wassermann, J., G. Senfaute, F. Homand, and **D. Amitrano**, (2004) Auscultation micro-sismique de l'ennoyage des ouvrages miniers du site expérimental de Tressange - Bassin ferrifère lorrain, in *JNGG*, Lille, 2004.
- 4.2. **Amitrano, D.** (1998). Emission acoustique de roches intactes et fissurées en compression triaxiale. *Concours jeunes chercheurs XVIemes Rencontres de l'AUGC*, Reims, pp 1-8.
- 4.3. **Amitrano, D.**, D. Hantz, and Y. Orengo. (1996). Etude en laboratoire de l'émission acoustique des joints et du matériau rocheux. *Recueil de communications du Colloque GEO 1996*, Aussois, 6 p.

5. Conférences invitées : 3

- 5.1. **Amitrano, D.** (2005). Failure by damage accumulation in rocks. 7th International Conference on the Fundamentals of Fracture, planned on May 22-27 in Nancy, France. Invité par G. Michot.
- 5.2. **Amitrano, D.**, (2004). What does make the b-value change? The role of the mechanical conditions. AGU Fall meeting, San Francisco. Invité par S. Wiemer.
- 5.3. **Amitrano, D.**, J.R. Grasso, G. Senfaute, J.L. Got, S. Gaffet, and C. Clement (2004), Potential of the seismic monitoring for the understanding of gravitational instability, *RST*, Strasbourg, 21 septembre 2004. Invité par O. Maquaire.

6. Congrès Internationaux avec publication des résumés : 15 publications

- 6.1. **Amitrano, D.**, D. Grgic, F. Homand, and J.P. Henry (2005), Long term behavior of a galery within a clay repository: Impact of stress and water saturation perturbation, *2nd Int. Symp. "Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement"*, Tours, mars 2005.
- 6.2. **Amitrano, D.**, (2004). What does make the b-value change? The role of the mechanical conditions, in *AGU Fall meeting*, San Francisco, sollicited paper n° S22A-04.
- 6.3. **Amitrano, D.**, J.R. Grasso, G. Senfaute, J.L. Got, S. Gaffet, and C. Clement, (2004). Seismic monitoring of gravitational instability, in *RST*, pp. abstract n°RSTGV-A-00511, Strasbourg, 2004
- 6.4. **Amitrano, D.**, Senfaute, G., Grasso, J.R., Got, J.L., Gaffet, S. and Clement, C., (2004). Potential of the seismic monitoring for the understanding of gravitational instability, AGU Fall Meeting, San Francisco, paper n°H44A-06.
- 6.5. Grasso, J.R., **D. Amitrano**, and G. Senfaute (2004), Critical behaviour of the seismic

- precursors of a cliff collapse, in *AGU Fall meeting*, San Francisco, paper n°NG33A-0883.
- 6.6. Allodi, A., M. Castelli, **D. Amitrano**, V. Saetta, and C. Scavia, (2004) A BEM model for hydromechanical behaviour of rock fracture and associated induced seismicity, in *EGU General Assembly*, Nice, Geophysical Research Abstract Volume 6, 2004, Abstract-number EGU-A-01805.
 - 6.7. **Amitrano, D.**, J.R. Grasso, and G. Senfaute, (2004) Statistical properties of cliff collapse seismic precursors, in *EGU General Assembly*, Nice, Geophysical Research Abstract Volume 6, 2004, abstract-number EGU-A-01830.
 - 6.8. **Amitrano, D.**, (2003) Emerging complexity in a simple damage model, in *EGS-AGU-EUG Joint Assembly*, Nice, Geophysical Research Abstract Volume 5, 2003, abstract-number EAE-A-02217.
 - 6.9. **Amitrano, D.**, (2003) Seismicity and brittle-ductile transition : evidences of the b-value pressure dependence, in *EGS-AGU-EUG Joint Assembly*, Nice, Geophysical Research Abstract Volume 5, 2003, abstract-number EAE-A-01838.
 - 6.10. Saetta, V., **D. Amitrano**, Y. Guglielmi, and G. Senfaute (2003), Water percolation inducing microseismicity : evidences from small scale in-situ experiment, in *EGS-AGU-EUG Joint Assembly*, Nice, Geophysical Research Abstract Volume 5, 2003, abstract-number EAE-A-01859.
 - 6.11. Wassermann, J., **D. Amitrano**, G. Senfaute, and F. Homand (2003), Damage evolution during uniaxial compressive tests characterized by acoustic emission monitoring, in *EGS-AGU-EUG Joint Assembly*, Nice, Geophysical Research Abstract Volume 5, 2003, abstract-number EAE-A-05431.
 - 6.12. **Amitrano, D.** and J. Schmittbuhl (2002). Fracture roughness and gouge distribution of a granite shear band. 26th General Assembly of the European Geophysical Society, Nice April 2002, Geophysical Research Abstract Volume 4, 2002, paper n°968.
 - 6.13. **Amitrano, D.**, Senfaute, G., (2001), Statistical properties of mining induced seismicity : Relation between energy and spatial scaling invariance, 26th General Assembly of the European Geophysical Society, Nice, Mars 2001, Geophysical Research Abstract Volume 3, 2001, paper n°8231
 - 6.14. **Amitrano, D.**, Grasso, J.R. (1999). Earthquakes clustering as driven by local interaction geometry. *Congress of the Seismological Society of America 99*, Seattle, 2-5 mai 1999, abstract published in *Seismological Research Letters*, p. 190.
 - 6.15. Helmstetter, A., Grasso, J.-R., **Amitrano, D.**, Baumont, D., Dietrich, M., Garambois, S., Guiguet, R., Hellman, R., Janod, F., Lahaie, F., Lambert, M., Martinod, J., Noir, J., Thomas, J.-C., and Van-der-baan, M. (1999). What can icequakes tell us about earthquake mechanics. *Congress of the Seismological Society of America 99*, Seattle, 2-5 mai 1999, abstract published in *Seismological Research Letters*, p. 190.

7. Communications et posters : 13

- 7.1. **Amitrano, D.** (2004). Mécanique et sismicité des versants rocheux instables. Séminaire à l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg, séminaire à l'IPGS, 5 février 2004.
- 7.2. **Amitrano, D.**, J. R. Grasso and M. Jeannin (2002). *Sismicité des versants instables: Apports potentiels, le cas des Ruines de Séchilienne*. Atelier de Travail PNRN-ACI, 24-25 janvier Nice.
- 7.3. Saetta, V., **D. Amitrano**, Y. Guglielmi and G. Senfaute (2002). *Sismicité et hydromécanique des versants rocheux instables: site expérimental de Coaraze*. Atelier de Travail PNRN-ACI, 24-25 janvier 2002, Nice.
- 7.4. **Amitrano, D.**, V. Saetta, G. Senfaute, J.-R. Grasso, J.-L. Got, A. Helmstetter, Y. Guglielmi, D. Jongmans, J.-M. Vengeon, A.-M. Duval, J.P. Meneroud, L. Effandiantz (2001). Sismicité et mécanique des versants rocheux instables. Poster, Séance

- spécialisée de la Société Géologique de France, Besançon, 10 Juillet 2001.
- 7.5. **Amitrano, D.** (2000), Sismicité et endommagement des roches : Expérience, modélisation et changement d'échelle. Séminaire au LGIT-Chambery, le 21 décembre 2000.
 - 7.6. **Amitrano, D.** (2000), *Sismicité et endommagement des roches : Expérience, modélisation et changement d'échelle*. Séminaire au Centre technique de l'équipement (CETE) de Nice, le 18 janvier 2000.
 - 7.7. **Amitrano, D., D. Hantz, J.R. Grasso** (1999), *Microsismicité et localisation de l'endommagement des roches : Approches expérimentale et numérique*, Communication à la journée du Comité français de mécanique des roches (CFMR), Paris le 14 octobre 1999.
 - 7.8. **Amitrano, D.** (1999), *Sismicité et endommagement des roches : Expérience, modélisation et changement d'échelle*. Séminaire à l'Institut de Pour la Sureté Nucléaire (IPSN), Fontenay aux Roses le 19 novembre 1999.
 - 7.9. **Amitrano, D., Hantz, D., Grasso, J.R.** (1999). Damage localisation and brittleness of rocks: experimental and numerical approach, Poster, *Congress of International Society of Rock Mechanics*, Paris, Août 1999.
 - 7.10. **Amitrano, D.** (1999), *Expérience et Modèle de la sismicité des roches : Emission acoustique et endommagement*, Communication à la journée des doctorants de l'ANDRA, 24 juin 1999. Comptes-rendus p.133-145.
 - 7.11. **Amitrano, D.** (1999), *Expérience et Modèle de la sismicité des roches : Emission acoustique et endommagement*, Séminaire au Laboratoire de Géologie de l'ENS Paris, 17 mai 1999.
 - 7.12. **Amitrano, D.** (1997). L'émission acoustique des roches: un moyen de surveillance des versants instables. Poster, 8^{èmes} Rencontres Régionales de la Recherche, 26 sept. 1997, Lyon-Satolas, France.
 - 7.13. Boulon, M., G. Armand, **D. Amitrano**, D. Hantz, S. Cannic (1997). Propriétés des joints et leur rôle dans le comportement mécanique de la granodiorite de la Vienne. Poster, Journées scientifiques de l'ANDRA, 20-21 oct. 1997, Poitiers, France.

8. Ouvrages (1), rapports de recherche (7) :

- 8.1. Senfaute, G., **Amitrano, D.**, Forney, F., (2001), « Etude expérimentale en laboratoire de l'endommagement des roches par des méthodes acoustiques et tomographiques. Résultats et bilan des essais en laboratoire », Rapport GISOS, DRS-01-25303/RN03, mars 2001, 72 p.
- 8.2. **Amitrano D.**, (2000) « Evaluation du matériel ECW d'acquisition de l'émission acoustique au cours d'essais de compression en laboratoire. Bilan et premiers résultats », Rapport d'avancement GISOS, novembre 2000, 28 p.
- 8.3. Senfaute, G., **Amitrano, D.**, Forney, F., (2001) « Etude expérimentale en laboratoire de l'endommagement des roches par des méthodes acoustiques et tomographiques. Phase 1 », Rapport GISOS, DRS-00-25303/RN01, septembre 2000, 31 p.
- 8.4. **Amitrano D.**, (2000) « Evaluation du matériel PAC d'acquisition de l'émission acoustique au cours d'essais de compression en laboratoire. Bilan et premiers résultats », Rapport d'avancement GISOS, mai 2000, 30 p.
- 8.5. **Amitrano, D.** (1999). Emission acoustique des roches et endommagement : Approches expérimentale et numérique, application à la sismicité minière. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, 21 janvier 1999, Grenoble, 253 p.
- 8.6. Antoine, P., **Amitrano, D.**, Brovero, M., Campus, S., Evrard, H., Follacci, J.P., Forlatti, F., Gillet, F., Giraud, A., Hantz, D., Ramasco, M., Rochet, L., Scavia, C., Susella, G., Vengeon, J.M., Zanolini, F. (1998). *Risques générés par les grands mouvements de versant*. Programme INTERREG 1 France-Italie, 207 p.

- 8.7. **Amitrano, D.**, Orengo, Y., Hantz, D.(1997). Enregistrement et analyse de l'émission acoustique produite au cours d'essais de cisaillement direct d'échantillons rocheux. LIRIGM. Rapport final, Contrat avec le Laboratoire 3S, Grenoble, Avril 1997, 46 pages.
- 8.8. . **Amitrano, D.** (1994). Mécanismes de déformation des massifs rocheux. Rapport de DEA, Université Joseph Fourier, Grenoble, juin 1994, 53 pages.

Annexe 2 :

Résumé des activités et responsabilités de recherche

Résumé de la recherche 1999-2005 : Endommagement et sismicité à différentes échelles¹

Mes activités de recherche s'articulent autour du thème de la sismicité liée au comportement mécanique des roches et des invariances d'échelle qui les caractérisent. Un premier objectif est de parvenir à interpréter mécaniquement la sismicité observée à différentes échelles (échantillon de laboratoire, massif rocheux, croûte terrestre), en particulier pour la recherche de précurseurs de la rupture. Ce thème trouve ses applications dans plusieurs domaines : prévision des coups de terrain dans les mines, des effondrements miniers en surface, des éboulements et glissements de terrain, des séismes. Un second objectif consiste à rechercher l'origine et les limites des invariances d'échelle que l'on observe dans la dynamique de la sismicité (distribution de taille, dans le temps et l'espace) et dans les structures d'endommagement. Ceci a pour but d'estimer la faisabilité et la pertinence des changements d'échelle entre le laboratoire, le massif rocheux et la croûte terrestre. Ce dernier point passe par l'étude de la dynamique non linéaire et la complexité de la mécanique des matériaux de la Terre.

Une partie de ma recherche est basée sur des expériences de laboratoire. L'étude du comportement d'un granite a permis de mettre en évidence l'impact de la pression de confinement sur la structure de l'endommagement (ref. 1.6) et sur la sismicité induite par la fissuration (ref. 1.5). La confrontation avec des structures de failles sismiques a permis de proposer des conditions mécaniques in situ à l'origine de ces structures (ref. 1.3). Pour mieux comprendre ces observations, j'ai développé un modèle numérique qui permet de simuler les différents comportements mécaniques observés en laboratoire, l'activité sismique et les structures d'endommagement associées (ref. 1.8). Il permet de simuler un certain nombre d'observations expérimentales : comportement mécanique allant du fragile au ductile, structure fractale de l'endommagement, distribution en loi puissance des avalanches d'endommagement. Ces propriétés macroscopiques ne sont pas introduites à l'échelle élémentaire mais résultent de l'interaction entre éléments. L'émergence de cette complexité permet de considérer le processus de déformation des roches comme un système complexe possédant une dynamique non-linéaire (ref. 1.4). Ce modèle a été confronté également à la sismicité crustale (ref. 1.5). Il a permis, par exemple, d'interpréter mécaniquement les différences de propriétés statistiques de la sismicité observée dans deux régions sismiques des Alpes et de proposer des comportements mécaniques différents pour ces deux zones (ref. 1.7).

L'analyse des propriétés statistiques de la sismicité menée dans cette recherche a également pour but de rechercher des précurseurs à la rupture. Cette approche a donné des résultats intéressants dans le cas d'une falaise de craie (Mesnil-Val, Normandie) sous surveillance micro-sismique où nous avons observé une évolution particulière des propriétés statistiques, annonciatrice de l'effondrement (ref. 1.2). Ce comportement est comparable à ce que l'on peut observer en laboratoire lors de la phase tertiaire de fluage. Afin de mieux interpréter ces observations, j'ai développé un modèle numérique de fluage (ref. 1.1) basé sur un endommagement progressif et dépendant du temps (fissuration sous-critique). Ce modèle reproduit un comportement comparable à ce qu'on observe in situ et confirme l'hypothèse d'un effondrement apparaissant dans la phase ultime du fluage tertiaire. Ce modèle a été utilisé pour simuler l'endommagement progressif et à long terme d'un versant rocheux. Le

¹ Les références numérotées renvoient à la liste des publications données en annexe 1.

champ d'endommagement résultant de ces simulations peut être utilisé comme élément de calage par comparaison avec les données obtenues par investigation géophysique.

Cette recherche s'appuie également sur les données issues de plusieurs campagnes d'écoute sismique sur différents versants instables (Séchilienne, Isère ; La Clapière et Coaraze, Alpes Maritimes). Les premiers résultats ont permis de montrer la faisabilité de ces mesures sur des massifs rocheux instables. La quantité importante de données acquises a nécessité le développement d'une méthodologie de traitement particulière, adapté à ce grand nombre. Nous avons mis en évidence l'existence d'une sismicité haute fréquence induite par la percolation de l'eau dans un massif fracturé de petite dimension (Thèse de Valeria Saetta, 2004). Un modèle micromécanique a été proposé qui explique cette sismicité induite par l'ouverture instable des aires de contact des fractures.

Principales responsabilités scientifiques et administratives.

- Titulaire de la prime d'encadrement doctoral et de recherche (PEDR) depuis octobre 2002.
- Membre suppléant de la commission de spécialistes de la 60^{ème} section de l'INPL de 2000 à 2004.
- Reviewer pour la revue *Journal of Geophysical Research*.
- Rapporteur extérieur au comité scientifique pour l'évaluation de projets en réponse à l'appel d'offre l'ACI « Aléas et Changement Globaux » de l'INSU en 2004.
- Organisation de deux ateliers de travail de deux jours regroupant les participants au projet ACI-SAMOA et ouvert au reste de la communauté scientifique, (Barcelonnette, octobre 2003, 25 participants ; Grenoble, février 2005, 40 participants).
- Organisation d'un colloque de deux jours regroupant les participants à deux projets liés aux instabilités gravitaires (PNRN-ACI), et ouvert au reste de la communauté scientifique, janvier 2002, à Nice (80 participants).
- Participation à l'organisation des Journées Nationales de Géologie et Géotechnique (JNGG), à Nancy, en septembre 2002 (120 participants).

Coordination et participation à des projets scientifiques.

Depuis ma nomination comme maître de conférences en septembre 1999 à l'Ecole des Mines de Nancy, j'ai collaboré à plusieurs projets des recherches, soit comme participant (GISOS, PNRN *Instabilités gravitaires*, Réseau INPL *Chaos*), soit comme responsable ou co-responsable (ACI *Sismicité des versants instables* et SAMOA, Forpro *GéomécaFor*). Le tableau suivant donne une vue synthétique de ces collaborations.

Projet	Fonction	Thème	Soutien financier	Période	Participants
ACI <i>Catastrophes Naturelles</i> Coord : C. Delacourt, D. Amitrano, O. Maquaire	Co-responsable	SAMOA Surveillance et Auscultation des Mouvements gravitaires Alpins	INSU	3 ans 2003-2005	8 Laboratoires 34 Chercheurs
Forpro « GéomécaFor » Coord. : JP Henry, puis F. Homand, D. Amitrano	Co-responsable	Suivi des déformations d'une cavité non revêtue	Forpro-Cnrs/Andra	3 ans 2004-2006	4 Laboratoires 8 Chercheurs
ACI <i>Risques Naturels et Changements Climatiques</i> Coord. : J. Schmittbuhl, D. Marsan, M. Bouchon	Participant	Aléas Sismique : modélisation de hétérogénéités spatio-temporelles	INSU	3 ans 2003-2005	5 Laboratoires 14 Chercheurs
ACI <i>Catastrophes Naturelles</i> Coord. : D. Amitrano	Responsable	Sismicité des versants instables	INSU / INERIS	3 ans 2000-2002	6 Laboratoires 11 Chercheurs
PNRN <i>Instabilités gravitaires</i> Coord. : Y. Guglielmi	Participant	Mécanismes des instabilités gravitaires	INSU	3 ans 2000-2002	5 Laboratoires 12 chercheurs
GISOS Laego/Ineris Coord. : F. Homand	Participant	Emission acoustique et endommagement	GISOS	4 ans 2001-2004	2 Laboratoires 4 Chercheurs
Réseau Chaos INPL Coord. : JR Angelilla	Participant	Caractérisation et contrôle du chaos	INPL	Début en 2003 Durée indéfinie	5 Laboratoires 12 Chercheurs

Tableau synthétique des projets de recherche nationaux auxquelles je collabore ou dont je suis responsable.

Participation à l'encadrement de thèses :

- Valeria Saetta : *Micro-seismicity and hydro-mechanics of fractured rock masses : experiments and numerical simulations* (manuscrit en anglais),
 - Soutenue en juin 2004 à Turin, Italie.
 - Encadrement à 60 %.
 - Co-encadrement avec JP Piguet (INPL) et C. Scavia (Politecnico de Turin).
 - Situation actuelle : Ingénieur d'étude dans une entreprise de géotechnique
- Jérôme Wassermann : *Comportement mécanique et endommagement du minerai de fer suivi par émission acoustique et mesures ultrasonores*.
 - Soutenance prévue au printemps 2005.
 - Encadrement à 50 %, Co-encadrement avec F. Homand (INPL) et G. Senfaute (Ineris).
- Jamil Damaj : *Auscultation et surveillance des perturbations hydromécaniques d'ouvrages souterrains par mesures ultrasonores*.
 - Soutenance prévue fin 2005.
- Encadrement à 30 %, Co-encadrement avec F. Homand (INPL) et T. Verdel (INPL)

Annexe 3 : Activités d'enseignement

Résumé :

Depuis septembre 2005 je suis enseignant à l'IUT de Génie Civil de l'université Joseph Fourier de Grenoble, où j'enseigne essentiellement la géologie et les matériaux du Génie Civil. Etant donné le caractère très récent de cette affectation, j'explicite ci-dessous principalement mon expérience d'enseignant acquise dans mes fonctions précédentes.

Ma première expérience d'enseignant a été acquise en tant que vacataire au cours de ma thèse (1996-1998) puis comme ATER (1998-1999) à l'université Joseph Fourier de Grenoble. Au cours de cette période, j'ai donné des cours magistraux de traitement du signal à l'ISTG (désormais *Polytech Grenoble*), des travaux pratiques Intensifs (TPI) d'émission acoustique des roches en magistère de mécanique, des cours et TD de technologie mécanique en IUP de génie mécanique et de génie de systèmes industriels. Un tableau récapitulatif de ces enseignements est donné en fin de section.

De septembre 1999 à août 2005 j'ai enseigné comme maître de conférences à l'École des Mines de Nancy, essentiellement dans la *Filière Ingénieur Civil des Mines* (FICM – Bac +3 à bac +5). Mes activités ont concerné à la fois des enseignements généraux de première année, des enseignements du département *Sciences de la Terre et Environnement* (STE) en deuxième et troisième années et des activités d'encadrement de stages et de projets. J'interviens également occasionnellement à l'Ecole de Géologie de Nancy.

J'ai été responsable des cours de Géotechnique et de Géostatistique, assistant de TD de statistique et encadrant d'un camp de terrain de géologie. Mon investissement dans mes activités d'enseignement a principalement consisté en la préparation des cours dans des matières que je n'avais jamais enseignées (statistique, géotechnique, géostatistique, géologie de terrain), et en l'assimilation de la pédagogie de l'école des Mines de Nancy (*méthode Schwartz*). En effet, l'objectif de la formation est non seulement de fournir un savoir de base pour l'ingénieur, mais également d'amener les élèves à prendre une part active aux enseignements afin d'acquérir une certaine autonomie. Cet objectif est aussi celui des projets au cours desquels on cherche à développer le travail en groupe et le sens de l'organisation. La particularité des enseignements du département *Sciences de la Terre et Environnement* est d'amener les étudiants à mettre en œuvre la démarche *observation* (de terrain ou de laboratoire), *conceptualisation*, *modélisation numérique*, particulièrement appropriée à l'étude des objets géologiques.

Une part importante des enseignements de deuxième année s'articule autour du *projet autoroute-Corbières* au cours duquel nous développons plus particulièrement cette approche. A partir des observations obtenues en camp de terrain de géologie (dans les Corbières), les élèves élaborent d'abord une carte géologique (1/2 semestre) ; ils établissent ensuite un avant projet d'implantation d'autoroute sur le terrain étudié (1/2 semestre) ; enfin ils doivent réaliser une modélisation numérique (1 semestre) correspondant à un problème particulier d'implantation d'ouvrage (pont, pilier, tunnel, talus, ...). Ce projet permet aux élèves de réaliser une approche globale d'ingénierie du terrain vers l'ouvrage avec une grande cohérence. Les différentes phases de ce projet sont synchronisés avec les autres enseignements du département (géologie, géotechnique, modélisation). Ceci aide les élèves à valoriser leur savoir théorique dans le cadre d'une application technique.

Le tableau suivant donne une synthèse de mes activités d'enseignement de 1999 à 2005, avec les volumes horaires annuels correspondants.

Enseignement	Période	ENSMN (cycle ingénieur civil des mines)			ENSG
		1 ^{ère} année	2 ^{ème} année	3 ^{ème} année	
Statistique	1999-2005	26 h/an	-	-	-
Éléments de Géotechnique	1999-2005	-	50 h/an	-	-
Géotechnique et Modélisation	1999	-	30 h/an	-	-
Camp de terrain de géologie	1999-2005	-	36 h/an	-	-
Géostatistique	2000-2005	-	-	50 h/an	-
Encadrement de projets	1999-2005	-	20 h/an	-	-
Encadrement de stages	1999-2005	-	-	20 h/an	-
Sismicité naturelle et induite (Ecole de Géologie)	2001, 2003	-	-	-	8 h/an
Participation à l'organisation du département	2000-2005		10 h/an	10 h/an	-
Total du service		1290 h (217 h/an)			

Tableau récapitulatif de l'activité d'enseignement à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Nancy de septembre 1999 à août 2005. Le volume horaire est donné en équivalent TD.

Le tableau suivant résume mon activité d'enseignement avant ma nomination comme maître de conférences à l'école des mines de Nancy.

Enseignement	Année	Filière	Volume horaire
Cours de traitement du signal	1995/96	ISTG, 3 ^{ème} année	12 h
TPI émission acoustique	1995/96 → 1998/99	Magistère de mécanique 2 ^{ème} année	128 h
Cours et TD de technologie mécanique	1998/99	IUP GM et GSI, 1 ^{ère} année	72 h
Total			212 h

Tableau récapitulatif des enseignements réalisés à l'université Joseph Fourier en tant que vacataire (1995-1998) et ATER (1998/99). Le volume horaire est donné en équivalent TD.

Détails des activités d'enseignement de 1999 à 2005 :

La plupart des enseignements dispensés à l'Ecole des Mines de Nancy sont organisés en séance de trois heures comprenant une première partie de cours magistral, d'environ une heure, suivie de travaux dirigés, au cours desquels les élèves sont incités à travailler en petits groupes.

Eléments de Géotechnique : Cours du département *Science de la Terre et Environnement* (STE) en 2^{ème} année, 15 séances de 3 heures, 25 élèves, dont je suis responsable depuis 2000. L'objectif est de donner les outils de base de la géotechnique (mécanique des roches et des sols) en mettant en évidence les hypothèses simplificatrices et l'aspect incertain des

paramètres utilisés dans les calculs nécessaires à l'implantation des ouvrages dans le milieu naturel.

Géostatistique et aide à la décision : Cours du département STE de 3^{ème} année, 10 séances de 3 heures, 20 élèves, dont je suis responsable depuis 2000. L'objectif de ce cours est de fournir les bases conceptuelles, les outils d'analyse structurale et d'estimation de données présentant une corrélation spatiale. Une partie des TD est réalisée sur ordinateur pour traiter des données réelles issues de divers domaines des sciences de la terre (topographie, bathymétrie, sismicité, teneur en minerai, perméabilité, fracturation).

Camp de terrain de géologie : Il s'agit d'un camp de terrain du département STE, en début de 2^{ème} année (responsable B. Laumonier), d'une durée d'une semaine, 25 élèves. Les élèves doivent réaliser une carte géologique à partir d'observations de terrain sur le chaînon de Lagrasse (Corbières).

Statistique pour l'ingénieur : Cours de tronc commun scientifique de 1^{ère} année (responsable T. Verdel), 10 séances de 2 heures de TD, 16 élèves. Pour ce cours, j'ai cherché à amener les élèves, travaillant par groupes de 4/5, à avoir un regard critique sur les modèles proposés par la statistique, leur domaine de validité et les hypothèses sous-jacentes à leur utilisation.

Géotechnique et modélisation : Cours du département STE de 2^{ème} année (responsable V. Merrien-Soukatchoff), 15 séances de 3 heures, 25 élèves. L'objectif est de présenter les principales méthodes numériques utilisées pour la modélisation d'ouvrages en géotechnique, en mettant en évidence les hypothèses utilisées. Les TD sont réalisés sur ordinateur.

Sismicité naturelle et induite : Il s'agit d'un cours de 8 heures dispensé à l'Ecole de Géologie de Nancy (ENSG), dans le cadre d'un module d'une semaine consacré à la néotectonique. L'objectif est de montrer aux étudiants comment la sismicité peut être utilisée comme outil d'observation de la mécanique des objets géologiques. Le cours se base sur l'étude de plusieurs cas réels, issus de la littérature ou de mes recherches personnelles.

Encadrement des projets : Projets portant sur un des thèmes du département STE, réalisés en 2^{ème} année sur une durée d'un semestre. Ils visent à développer le travail en groupe (répartition des tâches et des responsabilités) et le sens de l'organisation du travail.

Encadrement de stages de fin d'études : Il s'agit de suivre le déroulement des stages de fin d'études (6 mois) que réalisent les élèves de 3^{ème} année. Une visite en entreprise, pour celles situées en France, est réalisée en milieu de stage.

Tutorat : Il s'agit de suivre des élèves tout au long de leur première année au sein de l'Ecole des Mines afin de les aider à formuler un projet de formation en adéquation avec leur projet professionnel.

Participation à l'organisation du département : Organisation des cours, invitation de conférenciers, organisation d'une semaine de visite de chantiers et de sites en deuxième semestre.

Annexe 4 : Curriculum vitae

Position actuelle : Maître de Conférences
LIRIGM, Université J. Fourier de Grenoble
IUT Génie Civil

35 ans, vie maritale,
deux enfants

Titres et diplômes

- 1999 **Doctorat** de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, en **Géomécanique**. Thèse soutenue le 21 janvier 1999 au LIRIGM avec mention "Très honorable avec félicitations". Titre : "*Emission acoustique des roches et endommagement : Approches expérimentale et numérique, application à la sismicité minière*". Directeur de thèse: D. Hantz. Jury : J.R. Grasso (président), C. Scavia (rapporteur), J.P. Piguet (rapporteur), S. Ciliberto (examineur), N. Hoteit (examineur).
- 1994 **DEA "Mécanique des Milieux Géophysiques et Environnement"**, Université Joseph Fourier (UJF), Grenoble, mention bien, major de promotion.
- 1993 Maîtrise de Technologie Mécanique, UJF Grenoble, mention bien.
- 1992 Licence de Technologie Mécanique, option enseignement, UJF Grenoble, mention assez bien.
- 1991 Unités de Valeurs de Mathématique et de Mécanique du DEST de Mécanique du CNAM, CUEFA Grenoble (cours du soir).
- 1990 DUT Génie Mécanique et Productique, IUT1, UJF Grenoble.

Activités de recherche

- Depuis sept 2005 : **Maître de conférence**, Laboratoire Interdisciplinaire Impliquant la Géologie et la Mécanique (LIRIGM), Université J. Fourier de Grenoble.
- 2002 Titulaire de la Prime d'Encadrement Doctoral et de Recherche (**PEDR**) depuis octobre 2002.
- 1999-2005 : **Maître de conférences**, Laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages (LAEGO), Ecole Nationale Supérieure des Mines de Nancy.
- 1999 Qualification dans les sections 35 (Terre profonde) et 60 (Mécanique)
- 1998/99 **ATER** (1/2 poste), Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche Impliquant la Géologie et la Mécanique (LIRIGM), Université Joseph Fourier, Grenoble.
- 1995/98 **Doctorant** au Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche Impliquant la Géologie et la Mécanique (LIRIGM), Université Joseph Fourier, Grenoble.
- 1994/95 Instrumentation in-situ, cartographie de glissements de terrain (SIG), Parc Naturel Régional du Vercors.
- 1995 Réalisation de traductions franco-italiennes dans le cadre du projet INTERREG 1 France - Italie.
- 1993/94 Stage de DEA (8 mois) : "Mécanismes de déformation des massifs rocheux". LIRIGM, Grenoble.
- 1993 Stage de maîtrise (3 mois) : "Etude dynamique d'un glissement plan", LIRIGM, Grenoble.

Activités d'enseignement

- Depuis sept 2005 : **Maître de conférence**, Université J. Fourier de Grenoble, IUT Génie Civil.
- 1999-2005 : **Maître de conférences**, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Nancy.
- 1998/99 **ATER** (1/2 poste), UFR de mécanique, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- 1996/98 **Vacataire**, UFR de mécanique et ISTG, Université Joseph Fourier, Grenoble.

Autres expériences professionnelles

- 1991/93 Surveillant d'externat (2 ans) à mi-temps en collège Touvet. Isère.
- 1990/91 Agent bureau d'étude et des méthodes (11 mois), Grenoble.
- 1990 Agent bureau d'étude (2 mois), La Tronche.

Langues étrangères

- Anglais (lu, écrit, parlé).
- Italien (langue maternelle), réalisation de traductions scientifiques.

Annexe 5 : Copie des publications dans des revues internationales et nationales

- Amitrano, D.** and A. Helmstetter (2005), Brittle creep, damage and time to failure in rocks, soumis à *Journal of Geophysical Research*,
- Amitrano, D.**, J. R. Grasso, and G. Senfaute (2005), Seismic precursory patterns before a cliff collapse and critical point phenomena, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 32, No 8, L08314, doi:10.1029/2004GL022270.
- Boullier A.M., K. Fujimoto, H. Ito, T. Ohtani, N. Keulen, O. Fabbri, **D. Amitrano**, M. Dubois, and P. Pezard, (2004) Structural evolution of the Nojima fault (Awaji Island, Japan) revisited from the GSJ drillhole at Hirabayashi, *Earth, Planets and Space*, 56, 1233-1240.
- Senfaute, G., **D. Amitrano**, F. Lehnard, and J. Morel (2004), Etude expérimentale en laboratoire de l'endommagement des roches de craie par méthodes acoustiques et corrélation avec des résultats in situ, *Revue Française de Géotechnique*, Vol 110, 1-12.
- Amitrano D.** (2004), Emerging complexity in a simple model of the mechanical behavior of rocks, *CR Geosciences*, 336 (6), 505-512 (doi:10.1016/j.crte.2003.11.023).
- Amitrano D.** (2003), Brittle-ductile transition and associated seismicity: Experimental and numerical studies and relationship with the b-value, *Journal of Geophysical Research*, 108 B1, 2044, doi:10.1029/2001JB000680, 15 p.
- Amitrano D.** and J. Schmittbuhl (2002), Fracture roughness and gouge distribution of a granite shear band, *Journal of Geophysical Research*, 107 B12, 2375, doi:10.1029/2002JB001761, 16 p.
- Sue, C., J. R. Grasso, F. Lahaie and **D. Amitrano** (2002). Mechanical behavior of western alpine structures inferred from statistical analysis of seismicity. *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, No 8, p 65-1:65-4.
- Amitrano D.**, Grasso, J.R., Hantz, D. (1999). From diffuse to localised damage through elastic interaction, *Geophysical Research Letters*, Vol. 26, No 14, p 2109-2112.

